IL CONTROLLO AUTOMATICO DEI SISTEMI

EDIZIONE ITALIANA

Neil M. Schmitt
Robert F. Farwell

GRUPPO EDITORIALE JACKSON

IL CONTROLLO AUTOMATICO DEI SISTEMI

Neil M. Schmitt
Robert F. Farwell

GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON
Via Rosellini, 12
20124 Milano

INDICE

PREFAZIONE

Questo libro riguarda l'automazione e in particolare il controllo elettronico dei processi automatizzati. Riguarda inoltre aspetti di produttività, concorrenza e profitto che vengono influenzati dalla decisione di automatizzare o meno un'attività o una produzione. La seconda rivoluzione industriale è in atto, e coloro che intendono sopravvivere alla concorrenza devono necessariamente adottare nuove tecnologie.
Elementi fondamentali dell'attuale rivoluzione industriale sono la possibilità di effettuare complesse elaborazioni, bassi costi, alta affidabilità, piccole dimensioni, ridotti consumi ed elevate prestazioni, e tutto ciò è stato reso possibile dai rapidi e profondi avanzamenti della microelettronica, dei circuiti integrati a semiconduttori e della tecnologia degli elaboratori.
Questo volume non è un manuale di progettazione, ed è stato scritto essenzialmente per introdurre il lettore nel campo dei controlli elettronici usati in automazione e per aiutarlo a comprendere la terminologia, le tecniche e i principi usati nell'automazione dei processi industriali. Inizia con un'esposizione dei concetti fondamentali di elettronica e di controllo che sono usati nei sistemi di automazione e mediante esempi analizza processi di tipo continuo, a lotti e a parti separate. Illustra quindi i dispositivi meccanici usati per il controllo di sistemi automatizzati e, dopo una descrizione dei principali componenti elettronici presenti nei sistemi di controllo, prende in esame alcuni circuiti digitali e il modo in cui essi possono essere combinati per realizzare un calcolatore di funzione. Un'analisi del software e dei linguaggi di programmazione conclude l'introduzione dei concetti fondamentali.
La restante parte del libro è volta soprattutto ad applicazioni dei tre tipi di processi che comunemente si incontrano – continui, a lotti e a parti separate – e per ciascuno di essi fornisce vari esempi che sono basati su concetti introdotti in precedenza. Poiché i robot hanno un ruolo di sempre maggior rilievo nei sistemi di automazione, viene dedicato un intero capitolo alla spiegazione delle loro funzioni, all'illustrazione dei tipi disponibili e delle loro applicazioni. L'esposizione si conclude con un esempio di controllo elettronico che collega fra loro tutti gli argomenti trattati in precedenza, e con un'analisi delle tendenze future nel campo dell'automazione.
Questo volume, come altri della stessa serie, porta ad approfondire passo a passo la conoscenza degli argomenti trattati. I lettori che già hanno padronanza delle nozioni fondamentali dell'elettronica e del controllo automatico possono iniziare dal Capitolo 5, ma quanto contenuto nei precedenti capitoli costituisce in ogni caso un ottimo riepilogo. Al termine di ogni capitolo è inserita una serie di quiz per un'autovalutazione di quanto si è appreso; le risposte sono riportate a fine volume.
L'aumento di produttività è di vitale importanza per ogni azienda che intende mantenere una posizione competitiva nel mercato mondiale e il controllo elettronico dei sistemi di automazione ne è l'elemento fondamentale. Gli autori si augurano sinceramente che questo materiale sia d'aiuto per le critiche decisioni che dovranno essere prese in futuro.

INTRODUZIONE ALL'EDIZIONE ITALIANA

Poco vi sarebbe da aggiungere, alla prefazione originale, circa gli scopi o la destinazione di quest'opera.
Sembra tuttavia opportuno rilevare che la moderna tecnologia elettronica, in gran parte sviluppata negli Stati Uniti d'America, oltre a mutare il nostro modo di vivere ha influenzato pure il nostro modo di esprimerci.
Questa influenza è caratterizzata, oltre che dall'inevitabile coniazione di neologismi, anche dalla trasposizione di alcuni significati e dalla sempre crescente sostituzione di termini in lingua inglese ai corrispondenti termini italiani. Avviene così che si parli di *controllo* anziché di comando, e di *input* o *output* anziché di ingresso o uscita, termini peraltro perfettamente corrispondenti.
Poco senso avrebbe, in questa situazione oggettiva, la ricerca di un esasperato purismo e pertanto in questo volume si è cercato di usare, di volta in volta, la terminologia più diffusa, pur senza tralasciare un'indicazione dei sinonimi più comuni.
Ci si augura che questo impiego della «lingua viva» faciliti al lettore sia il collegamento con nozioni precedentemente acquisite, sia l'ulteriore approfondimento della materia su altri testi sia, infine, l'eventuale dialogo con i tecnici del ramo.

CAPITOLO 1

STORIA ED IMPORTANZA DEL CONTROLLO INDUSTRIALE

INTRODUZIONE

La National Academy of Sciences statunitense recentemente ha affermato: «La moderna era dell'elettronica ha dato inizio ad una seconda rivoluzione industriale... Il suo impatto sulla società potrebbe essere ancora superiore a quello della prima rivoluzione industriale». All'inizio del secolo Henry Ford fu il primo grande artefice della rivoluzione industriale con l'automobile Modello T e la fabbricazione a linea di montaggio. Sia nell'industria automobilistica sia in qualunque tipo di attività di fabbricazione, di commercio, bancaria, assicurativa, di trasporto, d'insegnamento e in molti altri campi l'impatto dell'elettronica è rilevabile ogni giorno, e questo impatto ha un ritmo sempre crescente. Probabilmente ciò è dovuto soprattutto al fatto che l'elettronica aiuta a migliorare la produttività (prodotto per uomo/ora) e a mantenere la competitività sul mercato mondiale. E non solo migliora la produttività, ma anche il prodotto fabbricato o l'attività svolta raggiungono una qualità superiore, il consumo di energia diminuisce, l'affidabilità aumenta e i costi si abbassano. Tutto ciò conferisce un eccezionale interesse al controllo elettronico dei sistemi di automazione.

IN QUESTO CAPITOLO

Lo scopo di questo capitolo è di fornire al lettore la motivazione e il desiderio di comprendere i principi che sono alla base del controllo elettronico dei sistemi di automazione, in modo che egli possa svolgere un ruolo attivo in quest'era emozionante anziché essere un semplice spettatore. Viene inoltre definita l'automazione e sono analizzati i suoi influssi sull'industria e sulla società; sono infine introdotti i tipi fondamentali di dispositivi e di sistemi di controllo elettronico che saranno esaminati più in dettaglio nei capitoli seguenti.

L'AUTOMAZIONE

Che cos'è?

Questa domanda può dare luogo ad una molteplicità di risposte, perché ogni persona tende a rispondere in funzione del proprio ambiente e della propria esperienza. Per una casalinga l'automazione può essere la lavastoviglie automatica; per un operaio può essere un robot; per il presidente di una società potrebbe essere la differenza fra profitti e perdite. Nel suo significato più ampio, l'automazione è il controllo di processi automatizzati. Nel campo della ricerca e nei laboratori può servire a raggiungere una maggiore accuratezza e precisione, ma nella maggior parte delle applicazioni industriali l'automazione viene usata per aumentare la produttività.
Tutti questi concetti includono l'idea di usare energia elettrica e/o meccanica per azionare qualche tipo di macchina, alla quale è aggiunta una certa quantità di «intelligenza» che ne controlla il funzionamento in modo che aumenti la produttività, si riducano i costi, o vi siano entrambi questi vantaggi. Una macchina può funzionare per un maggior numero di ore in condizioni ambientali difficili, e può effettuare alcuni lavori più rapidamente e con meno errori dell'uomo. Inoltre la macchina non reclama, non sciopera e non richiede mai aumenti, vacanze o miglioramenti d'altro genere. La macchina, però, ha una capacità decisionale molto limitata al confronto di quella umana, e deve avere delle istruzioni predefinite (un programma) che controllino il suo funzionamento in ogni situazione.
Parte di questa seconda rivoluzione industriale, pertanto, è consistita nel porre l'uomo a controllare le macchine, invece di svolgerne egli stesso i compiti. Pertanto, la casalinga deve imparare a caricare correttamente la lavastoviglie e deve conoscerne le limitazioni, anziché imparare a lavare le stoviglie; analogamente, l'operatore di una fresatrice deve essere in grado di regolare e far funzionare una macchina a controllo numerico che effettua materialmente la fresatura delle parti.
Con l'avvento dei circuiti integrati (IC) all'inizio degli anni '60, e dei microprocessori all'inizio degli anni '70, la quantità di intelligenza che ha potuto essere posta in una macchina a costi ragionevoli ha fatto un enorme balzo innanzi. Il numero di operazioni complesse che hanno potuto essere automatizzate è molto aumentato e attualmente è economicamente possibile dedicare dei piccoli calcolatori (microcalcolatori) all'effettuazione di una singola operazione.

Come influenza il lavoro?

Molte persone hanno un timore infondato che «automazione» significhi «perdita di posti di lavoro», mentre è vero proprio l'opposto. Infatti, è *la mancanza di automazione* che può togliere lavoro. Un'azienda che non sia in grado di competere economicamente a causa di una bassa produttività derivante dalla mancanza di automazione sarà obbligata ad eliminare personale o perfino a cessare completamente la propria attività.
Questo è stato drammaticamente sperimentato nell'industria automobilistica e in quella delle macchine utensili. Nei soli Stati Uniti d'America, nel biennio 1981-82 l'industria automobilistica ha licenziato più di 40.000 fra impiegati e dirigenti e più di 250.000 operai a causa della contrazione delle vendite. Il costo dei prodotti era talmente aumentato che l'acquirente medio non poteva più pagarne il prezzo, e altre società dello stesso settore davano per lo stesso prezzo una maggiore contropartita.

Anche l'industria delle macchine utensili si è trovata nelle stesse condizioni. Tuttavia, mentre molti produttori di queste macchine erano costretti a ridurre il proprio personale, quelli che avevano automatizzato la produzione riuscirono ad aumentare il fatturato e ad avere una maggior quantità di ordini in portafoglio, per effetto del vantaggio economico che erano in grado di offrire.
Inoltre, molte applicazioni dell'automazione non comportano riduzioni di personale poiché le loro funzioni in precedenza non esistono neppure. Per esempio, una società ha realizzato risparmi di vari milioni di lire all'anno controllando automaticamente la quantità di ossigeno nei fumi di combustione delle proprie caldaie a vapore in modo da ottenere un più efficiente impiego del combustibile; un'altra società ha realizzato un risparmio dell'ordine di mezzo miliardo di lire all'anno installando un sistema automatico per il recupero di acetone dai vapori scaricati nell'atmosfera. In entrambi i casi i risparmi nei costi sono stati accompagnati da una riduzione dell'inquinamento atmosferico.

SITUAZIONE INTERNAZIONALE

Generalmente i consumatori acquistano i prodotti che offrono la migliore qualità al minor costo, indipendentemente dal fatto che questi prodotti siano stati o meno fabbricati nel proprio paese. Il successo di fabbricanti esteri di attrezzature fotografiche e cinematografiche, giochi e apparecchiature elettroniche è indicativo del grado di concorrenza esistente nel mondo. Per esempio, negli ultimi venti anni le vendite dei fabbricanti statunitensi in molti campi sono continuamente calate rispetto a quelle di produttori di altri paesi. Una causa determinante è stato l'aumento dei costi derivante da un calo di produttività. Nelle utilme due decadi la produttività negli U.S.A. è aumentata soltanto dell'1,6% all'anno, mentre in Giappone l'aumento annuale è stato del 7%, in Italia del 4,5% e in Francia del 4,1%. A causa del minor incremento di produttività, i costi di fabbricazione negli U.S.A. sono aumentati più che in altri paesi, e pertanto i prezzi dei prodotti statunitensi sono aumentati maggiormente. Ma qual'è la causa di questo calo di produttività negli U.S.A.?
La produttività è influenzata da numerosi fattori fra loro correlati, e l'automazione è uno dei più importanti. Altri paesi sono stati più aggressivi degli Stati Uniti nel campo dell'automazione; per esempio, più della metà dei circa 25.000 robot industriali operanti nel mondo sono installati in Giappone.

PERCHÉ GLI U.S.A. SONO RIMASTI INDIETRO NELL'AUTOMAZIONE?

Perché gli Stati Uniti non hanno tenuto il passo con l'automazione dei processi industriali quando la maggior parte delle tecniche e delle apparecchiature fondamentali sono state sviluppate proprio in questo paese? Il transistore, per esempio, è stato inventato dalla Bell Laboratories e il circuito integrato (IC) è stato inventato dalla Texas Instruments; i primi calcolatori digitali di grande e media potenza, i minicalcolatori, i microcalcolatori e i microprocessori sono stati tutti originariamente sviluppati negli U.S.A.
I primi lavori sui manipolatori a distanza per sostanze radioattive hanno portato alla realizzazione dei primi robot industriali negli U.S.A. prima del 1970, ed è stata la Air Force statunitense a far sviluppare le prime macchine utensili programmabili a controllo

numerico per la fabbricazione di rivestimenti, strutture portanti e altri elementi per aeroplani militari di elevate prestazioni.
Le apparecchiature per il controllo di processo erano pressoché un monopolio statunitense, e anche quelle vendute in altri paesi provenivano quasi interamente da sussidiarie di società statunitensi o da aziende che costruivano su licenza di società statunitensi. Malgrado ciò negli U.S.A. molte società attualmente si trovano in situazione critica perché i loro concorrenti stranieri hanno posto all'opera quelle attrezzature prima e in modo più efficiente di quanto esse stesse abbiano fatto.
Si consideri nuovamente, come esempio dell'impatto dell'automazione, l'industria automobilistica, che è la più grande industria mondiale a prodotto singolo. Nel 1960 gli Stati Uniti producevano il 48% dei veicoli a motore di tutto il mondo (circa 8 milioni) mentre il Giappone ne produceva soltanto il 3%. Inoltre gli Stati Uniti esportavano il 4% della loro produzione e i prodotti importati rappresentavano soltanto il 6% delle vendite nel paese.
Nel 1980 gli Stati Uniti producevano ancora circa 8 milioni di veicoli, ma avevano soltanto il 20% del mercato mondiale mentre il Giappone aveva raggiunto il 28% della produzione totale. Inoltre, nel 1980 negli Stati Uniti le vendite dei prodotti importanti raggiungevano il 25%. Come conseguenza, nel solo 1980 la contrazione nelle vendite delle case automobilistiche statunitensi ha superato i 4 miliardi di dollari. Anche varie altre industrie statunitensi hanno avuto un forte calo di vendite a causa della concorrenza straniera.

COME STA' REAGENDO L'INDUSTRIA STATUNITENSE?

Molti potranno sostenere che l'insufficiente automazione non è l'unica causa della riduzione nelle vendite. Certamente non è la *sola* causa, ma che cosa stanno facendo i fabbricanti statunitensi per tornare ad essere competitivi? *Stanno automatizzando la produzione!* Negli U.S.A. i produttori di automobili nel solo 1981 hanno speso per l'automazione dei loro impianti più di quanto sia stato speso per l'intero progetto «space shuttle». Evidentemente questi produttori ritengono che l'automazione sia la chiave per la ripresa – o addirittura per la sopravvivenza. Gli investimenti totali previsti dall'industria automobilistica supereranno il costo del programma spaziale Apollo e saranno completati in metà tempo di quest'ultimo.
Anche altre industrie hanno cominciato ad effettuare massicci investimenti in automazione, e questo ha creato una forte domanda di apparecchiature per il controllo industriale. È stato valutato che le dimensioni del mercato annuale per le apparecchiature e i servizi nel campo dell'automazione sono comprese fra 6 miliardi di dollari e la sconcertante somma di 50 miliardi di dollari, con un incremento annuale compreso fra il 10 e il 15%. Delle stime prudenziali sembrano indicare come più ragionevole un importo di 10 miliardi di dollari, di cui metà per apparecchiature e metà per servizi. Verrà ora brevemente esposto quali tipi di apparecchiature per il controllo industriale costituiscono questo mercato, e quali ne sono le caratteristiche.

IL CONTROLLO – CUORE DELL'AUTOMAZIONE

L'automazione di un processo industriale dipende dalla capacità di controllare il processo, ovvero di comandarne lo svolgimento, con un intervento ridotto o nullo da parte

dell'uomo. Ciò che deve essere controllato dipende dal processo, ma generalmente è richiesto l'avviamento, l'arresto e la regolazione del movimento, della posizione o del flusso di ciascuno dei componenti del processo stesso. Le possibilità di intervento solitamente dipendono a loro volta dalla possibilità di sorvegliare o misurare quelle variabili del processo che devono essere tenute sotto controllo per assicurare che il prodotto finale abbia le caratteristiche desiderate. Ciò dipende, a sua volta, dalla capacità di confrontare il prodotto ottenuto con quello desiderato e di effettuare regolazioni del processo se gli errori superano una soglia predeterminata; un sistema che abbia tutte queste caratteristiche viene chiamato «sistema di controllo». Questi concetti verranno sviluppati più in dettaglio nel Capitolo 2.

L'ELETTRONICA – CUORE DEL CONTROLLO

I sensori che in un sistema di controllo misurano lo stato delle variabili significative costituiscono gli input, o ingressi, del sistema, ma il cuore di quest'ultimo è il controllore, o unità di controllo elettronico. La maggior parte dei sistemi di automazione descritti in questo volume è realizzabile soltanto per merito dei recenti e prodigiosi progressi dell'elettronica. Sistemi di controllo che 5 anni fa non trovavano applicazione pratica esclusivamente a causa del costo elevato, sono già tecnicamente superati per effetto del rapido progresso tecnologico.
Si consideri, come esempio, il microcalcolatore. Il microcalcolatore a chip singolo è un calcolatore realizzato su una lastrina di silicio di circa 6 x 6 mm che può stare sulla punta di un dito (*Figura 1-1*). Il primo calcolatore elettronico digitale pesava circa 30

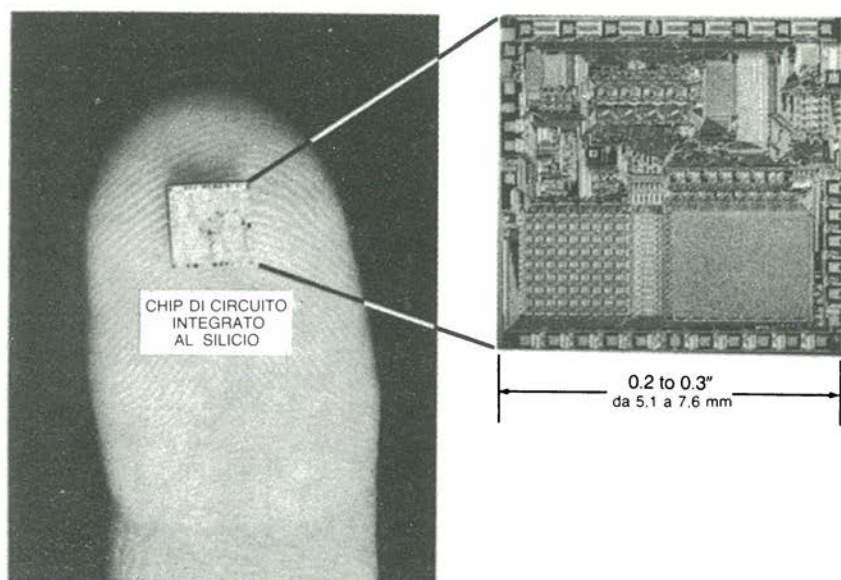



Figura 1-1. Microcalcolatore a chip singolo

tonellate, occupava parecchie stanze, richiedeva vari kilowatt di potenza e aveva una massima velocità operativa inferiore a 5.000 calcoli al secondo; il suo costo era dell'ordine di parecchi miliardi di lire. Il piccolo microcalcolatore che può stare sulla punta di un dito è invece in grado di effettuare quasi 1.000.000 di calcoli al secondo, richiede una potenza inferiore a quella di una lampada a pila e ha un costo inferiore a 150.000 lire.
Oggigiorno l'elemento fondamentale per il successo nell'automazione e nella fabbricazione concorrenziale è l'uso di sistemi elettronici di alta tecnologia in grado di consentire una fabbricazione flessibile mediante l'uso di sistemi elettronici programmabili. La Boeing Aircraft Corporation costruisce tutti i suoi aerei commerciali su un'unica linea di montaggio e fornisce allestimenti interni particolari semplicemente cambiando un programma di elaboratore. La Chrysler Corporation usa dei robot di saldatura, come mostrato in *Figura 1-2*, per saldare le scocche delle automobili; trenta robot di questo tipo hanno pressoché raddoppiato la produzione (portandola da 60 a 100 automobili all'ora) con un grado di affidamento significativamente superiore.
I bassi costi di elaborazione attualmente disponibili hanno consentito a queste aziende di automatizzarsi e al tempo stesso di adattare i sistemi alle loro applicazioni.
Per adattare un calcolatore ad una determinata applicazione viene predisposto un apposito insieme di istruzioni di controllo, chiamato programma. Per esempio, se il calcolatore controlla un robot che trapana dei fori in un pezzo metallico, la disposizione dei fori, la loro profondità, ecc. possono essere variate semplicemente cambiando il programma del calcolatore. Solitamente il programma è immagazzinato in un dispositivo elettronico chiamato chip di memoria. Il cambiamento del programma su questo chip

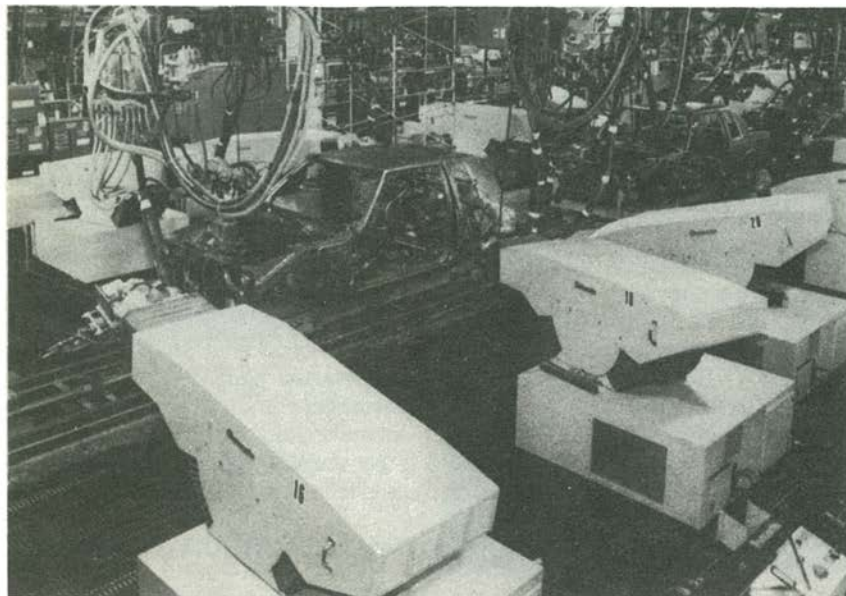



Figura 1-2. Robot saldatori

può essere fatto in pochi minuti. Naturalmente, la preparazione del programma richiede tempo, ma questo tempo e il relativo costo sono sensibilmente inferiori a quelli richiesti per il riattrezzamento di una macchina.
I capitoli 3 e 4 di questo libro prenderanno in esame i sensori, gli attuatori ed i componenti elettronici comunemente usati nei sistemi di controllo.

SISTEMI DI AUTOMAZIONE

L'applicazione dell'automazione elettronica ai processi industriali ha dato origine a vari tipi di sistemi, che possono essere classificati come segue:

1. Macchine utensili a controllo numerico.
2. Controllori programmabili.
3. Sistemi automatici di immagazzinamento e reperimento.
4. Sistemi robotizzati.
5. Sistemi flessibili di fabbricazione.

Ciascun tipo è brevemente descritto qui di seguito e verrà analizzato più in dettaglio nei successivi capitoli.

Macchine utensili a controllo numerico

Una macchina utensile utilizza un utensile o un gruppo di utensili azionati a motore per asportare materiale da un pezzo in lavorazione mediante fresatura, limatura, trapanatura, rettifica, oppure per inserire parti nel pezzo. Una macchina utensile può essere controllata in due modi:

1. Controllo continuo del percorso dell'utensile, quando il lavoro sul pezzo è continuo o pressoché continuo.
2. Controllo da punto a punto del percorso dell'utensile, quando il lavoro è effettuato soltanto su alcune parti del pezzo.

In entrambi i casi per indirizzare l'untensile nella corretta posizione devono essere specificate tre coordinate. Esistono dei programmi per elaboratori per calcolare le coordinate e produrre un nastro di carta, o magnetico, che contiene i dati numerici da usare per il controllo della macchina. Il guadagno di produttività ottenibile impiegando macchine a controllo numerico (CN) raggiunge valori di 3:1. Inoltre è richiesta una minor abilità da parte degli operatori e una sola persona può controllare più di una macchina. Se per il controllo della macchina anziché utilizzare un nastro si usa un calcolatore dedicato, il sistema è denominato macchina a controllo numerico a calcolatore (CNC). Il centro di lavorazione CNC rappresentato in *Figura 1-3* è in grado di scegliere fra oltre venti utensili e di effettuare differenti operazioni come fresatura, maschiatura, ecc.
Se il calcolatore è usato per controllare più di una macchina, il sistema è chiamato a controllo numerico diretto (CND). Il vantaggio di questo metodo consiste nella capacità di integrare la produzione di varie macchine nel controllo globale di una linea di montaggio; lo svantaggio è la dipendenza di varie macchine dal funzionamento di un singolo calcolatore. Il Capitolo 7 illustrerà alcuni esempi di altre macchine CN.

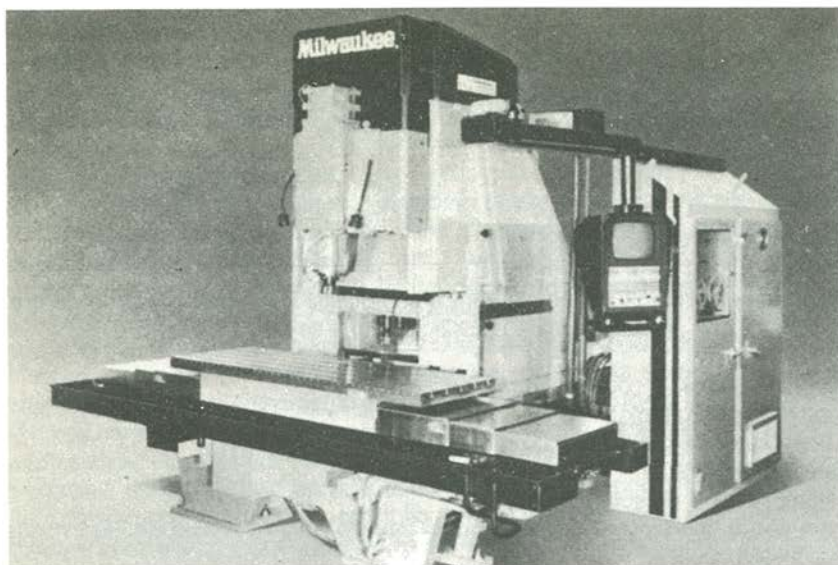



Figura 1-3. Macchina utensile CNC

Controllori programmabili

I controllori programmabili sono apparecchiature a stato solido che non solo possono controllare un processo un macchina, ma hanno anche la capacità di essere programmate o riprogrammate rapidamente in funzione delle necessità. Spesso ai controllori può

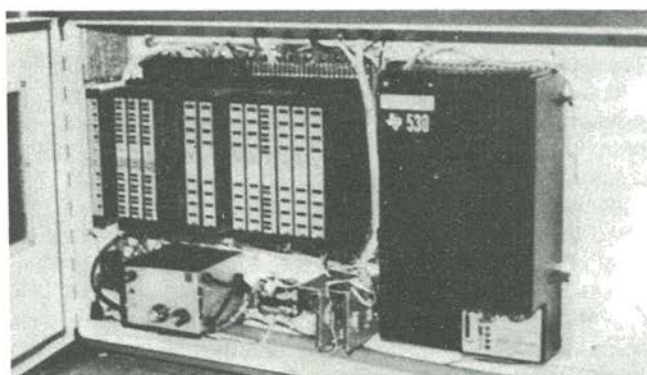



Figura 1-4. Controllore programmabile

essere collegata una tastiera alfanumerica (keyboard) o numerica (keypad) per la programmazione. La *Figura 1-4* mostra un tipico controllo programmabile.
Queste apparecchiature hanno una complessità variabile in funzione delle operazioni che devono controllare, e possono essere interfacciate con un minicalcolatore o un microcalcolatore operando come una macchina CND per aumentare la flessibilità di impiego; sono relativamente poco costose e sono facili da progettare e da installare. I Capitoli 6 e 8 analizzano le applicazioni dei controllori programmabili.

Sistemi automatici di immagazzinamento e reperimento

Le attività di immagazzinamento riguardano la conservazione di un insieme di parti o materiali che successivamente devono essere reperiti e spediti oppure usati. Nei sistemi automatizzati un calcolatore installato a distanza controlla sollevatori a forcella, gru o simili dispositivi di trasporto per ricevere, immagazzinare e recuperare gli oggetti. In controllo dei materiali presenti è accurato, e gli oggetti possono essere spediti o usati in conformità alla data di ricevimento. La catena di ristoranti McDonald, per esempio, impiega un sistema automatizzato per immagazzinare patate surgelate da friggere. Esistono anche aziende dove giornalmente vengono fatte centinaia di azioni di immagazzinamento come l'impiego di sistemi automatici di raccolta e distribuzione. Queste sono soltanto alcune delle nuove applicazioni in quest'area.

Sistemi robotizzati

Un robot è un dispositivo controllato a calcolatore che è in grado di effettuare movimenti in una o più direzioni mentre compie una sequenza di operazioni. Una macchina CNC può essere considerata un robot, ma solitamente l'uso di questo termine è riservato a quei dispositivi che hanno movimenti simili a quelli dell'uomo, in particolare a quelli delle braccia e delle mani.
Le operazioni possono essere lavorazioni come la trapanatura, ma in genere vengono svolti compiti come la saldatura, la presa e il collocamento di pezzi, il montaggio, la verifica e la verniciatura. Solitamente si pensa ai robot come a dispositivi di notevoli dimensioni, come quelli mostrati in *Figura 1-2*, ma in realtà le dimensioni possono essere molto piccole; per numerose applicazioni sono usati dei robot appoggiati su un banco o un tavolo, come quello mostrato in *Figura 1-5*.
Se un'operazione è relativamente semplice, ripetitiva o pericolosa per l'uomo, un robot può costituire la scelta appropriata. L'intelligenza dei robot sta aumentando con l'aggiunta della vista e dell'udito, e ciò consentirà l'espletamento di compiti sempre più complessi. I robot sono talmente importanti per il futuro dei sistemi di fabbricazione che tutto il Capitolo 9 è dedicato all'esplorazione del loro potenziale applicativo.

Sistemi flessibili di fabbricazione

L'impiego di macchine CN, di robot e di calcolatori in una linea di montaggio automatizzata dà luogo a quello che è chiamato «sistema flessibile di fabbricazione». Il termine flessibile deriva dal fatto che possono essere apportati dei cambiamenti sostanziali con un tempo e una spesa relativamente ridotti. Nella forma più completa, i materiali grezzi entreranno ad una estremità del sistema di lavorazione e il prodotto finito uscirà dal

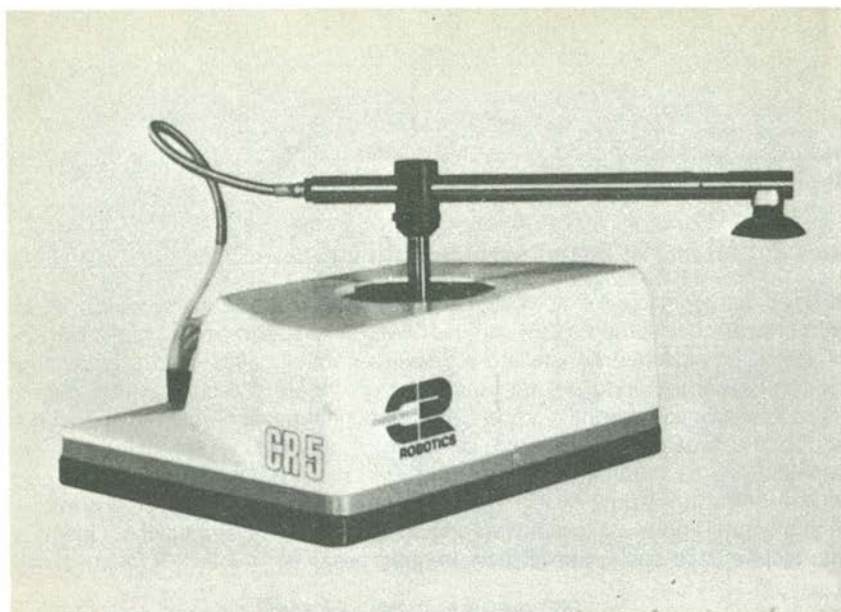



Figura 1-5. Piccolo braccio robotizzato

magazzino all'altra estremità, pronto per essere spedito, senza alcun intervento da parte dell'uomo. Al momento attuale questa è soltanto un'idea generale, sebbene siano già in funzione delle parti sostanziali di un tale sistema, tuttavia, con gli avanzamenti nel campo dell'automazione, idee di questo genere saranno presto una realtà.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. È in atto una rivoluzione industriale che comporta l'automazione dei processi produttivi.
2. L'automazione è l'impiego di energia elettrica e/o meccanica controllata da un sistema di comando intelligente (solitamente elettronico) per aumentare la produttività e ridurre i costi.
3. La mancanza di automazione può aumentare la disoccupazione.
4. I paesi con più elevato grado di automazione stanno conquistando porzioni sempre più ampie del mercato internazionale.
5. La capacità di controllare le fasi di un processo è l'elemento fondamentale dell'automazione.
6. I progressi nel campo dell'elettronica hanno consentito la realizzazione di complessi sistemi di controllo a costi economicamente vantaggiosi.
7. I vari tipi di sistemi automatici che possono essere applicati ai processi industriali sono: macchine a controllo numerico, controllori programmabili, sistemi automatici di immagazzinamento e reperimento, sistemi robotizzati e sistemi flessibili di fabbricazione.

Quiz per il Capitolo 1

1. La nuova rivoluzione industriale è stata determinata da:
a. agitazioni sociali.
b. progressi nell'elettronica.
c. richieste di salari più alti.
d. la guerra nel Vietnam.

2. Automazione significa:
a. persone che controllano macchine.
b. coadiuvare o sostituire persone con macchine.
c. aumento di produttività.
d. tutto quanto sopra.

3. L'automazione normalmente comporta:
a. una riduzione dei posti di lavoro.
b. un aumento dei posti di lavoro.
c. nessuna variazione nei posti di lavoro.
d. nulla di quando sopra.

4. In confronto agli uomini, le macchine:
a. possono lavorare in condizioni ambientali più difficili.
b. possono prendere decisioni più complesse sulla base di circostanze impreviste.
c. fanno meno errori.
d. «a» e «c» sopra.

5. L'automazione solitamente:
a. riduce i posti di lavoro.
b. aumenta la produttività o il profitto.
c. fornisce un vantaggio sulla concorrenza.
d. tutto quanto sopra.

6. La produttività è definita come:
a. numero di oggetti fabbricati al giorno.
b. produzione per uomo/ora.
c. costo per unità.
d. costo per giorno.

7. In generale, gli acquirenti comprano prodotti:
a. fabbricati nel proprio paese, anche se hanno costi più elevati.
b. che offrono la migliore qualità con il miglior prezzo.
c. senza considerare dove sono stati fabbricati.
d. «b» e «c» sopra.

8. Negli ultimi dieci anni la produttività è aumentata più rapidamente in:
a. Italia.
b. Giappone.
c. Stati Uniti.
d. Francia.

9. Negli ultimi dieci anni la produttività è aumentata meno rapidamente in:
a. Italia.
b. Giappone.
c. Stati Uniti.
d. Francia.

10. Confrontando il 1980 con il 1960, la produzione di automobili negli Stati Uniti è:
a. aumentata.
b. diminuita.
c. rimasta circa uguale.

11. Dal 1960 al 1980 la porzione statunitense del mercato mondiale delle automobili è:
a. aumentata di circa il 10%.
b. diminuita di circa il 28%.
c. diminuita di circa il 17%.
d. aumentata di circa il 39%.

12. Per lottare contro la concorrenza straniera, le aziende statunitensi stanno:
a. automatizzandosi.
b. cercando di aumentare le tariffe doganali sulle importazioni.
c. ignorando la situazione.
d. diminuendo i salari.

13. L'uso di una moderna tecnologia di controllo nei sistemi di automazione:
a. aumenta la resa.
b. riduce i costi.
c. migliora l'affidabilità.
d. tutto quanto sopra.

14. Il cuore della tecnologia dell'automazione è costituito dai:
a. robot.
b. calcolatori.
c. sensori.
d. dispositivi di controllo.

15. Il componente elettronico che ha avuto un'importanza fondamentale nei recenti sviluppi nel campo dell'automazione è il:
a. tubo a vuoto perfezionato.
b. circuito integrato.
c. transistore.
d. diodo.

16. Un microprocessore è:
a. un circuito integrato.
b. controllato da un programma.
c. relativamente poco costoso.
d. tutto quanto sopra.

17. I dispositivi programmabili sono vantaggiosi poiché:
a. consentono di apportare rapidamente i cambiamenti.
b. non sono più necessari i microprocessori.
c. soltanto del personale molto qualificato può apportare i cambiamenti.
d. nulla di quanto sopra.

18. Il paese ove è in uso il maggior numero di robot è:
a. U.S.A.
b. U.R.S.S.
c. Francia.
d. Giappone.

19. Quale dei seguenti può essere classificato come un sistema di automazione?
a. macchina utensile a controllo numerico.
b. sistema automatizzato di immagazzinamento.
c. robot.
d. tutto quanto sopra.

20. Un sistema flessibile di fabbricazione può essere:
a. una linea di montaggio automatizzata.
b. molto difficile da cambiare quando vengono introdotti dei nuovi prodotti.
c. costoso da modificare.
d. tutto quanto sopra.

CAPITOLO 2

FONDAMENTI DEL CONTROLLO INDUSTRIALE

IN QUESTO CAPITOLO

Dopo la lettura del primo capitolo sarà evidente che l'applicazione dei concetti di controllo elettronico alla fabbricazione e ad altri processi industriali non è soltanto desiderabile, ma necessaria. In questo capitolo verranno analizzati i tipi di processi da controllare, i tipi di sistemi e i metodi disponibili per svolgere funzioni di controllo; saranno anche analizzati i componenti e i segnali comunemente presenti nei sistemi di controllo. Verranno inoltre descritti i sistemi ad anello aperto (open loop) e quelli ad anello chiuso (closed loop), nonché le caratteristiche fondamentali dei sistemi di controllo.

TIPI DI PROCESSI

I processi industriali e di fabbricazione possono essere raggruppati in tre categorie, in funzione del tipo di operazione svolta:

1. Continui
2. A lotti
3. Per articoli discreti

Ognuno di questi processi ha delle proprie caratteristiche e presenta differenti problemi ai progettisti di sistemi elettronici.

Processo continuo

È un processo in cui i materiali grezzi sono immessi ad una estremità del sistema e il prodotto finito fuoriesce all'altra estremità, come indicato in *Figura 2-1*, mentre il processo è continuamente in funzione. Per un'applicazione di questo genere, il termine «continuo» significa in funzione per un periodo di tempo relativamente lungo; il periodo di tempo può essere misurato in minuti, giorni o anche mesi, a seconda del processo.

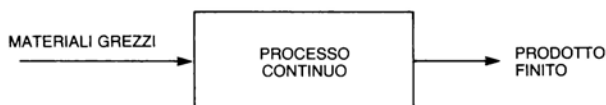



Figura 2-1. Modello di sistema continuo

Si consideri il processo di laminazione dell'acciaio illustrato in *Figura 2-2.* Dei pezzi di acciaio vengono fatti muovere su un sistema di convogliamento attraverso una serie di cilindri di laminazione che esercitano pressioni sui pezzi stessi per ridurne lo spessore. Questo è un processo continuo che viene misurato in minuti e che dipende dalla lunghezza dei pezzi di acciaio. In alcuni casi i pezzi si muovono attraverso i cilindri ad una velocità superiore a 450 metri/secondo. I cilindri tenditori posti fra i cilindri di laminazione hanno il compito di mantenere costante la tensione della lamiera. In un processo di laminazione dell'acciaio deve essere controllata la velocità del sistema di convogliamento, la velocità di rotazione e la pressione dei cilindri di laminazione e la tensione dei cilindri tenditori. In particolare, il carico sul primo gruppo di cilindri di laminazione viene assoggettato a brusche variazioni quando dei nuovi lingotti entrano fra i cilindri stessi.

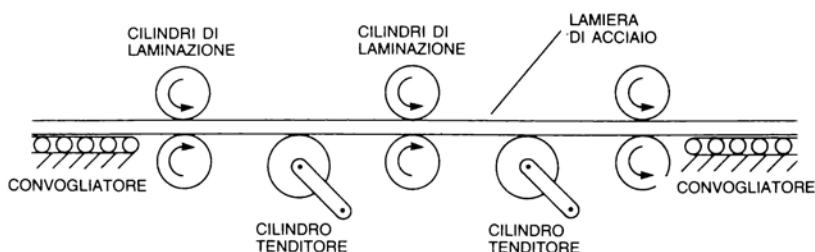



Figura 2-2. Processo di laminazione della lamina di acciaio

Processo discontinuo

In un processo discontinuo a lotti (batch) occorre preimpostare i dati relativi a tutte le variazioni del processo e quindi trattare contemporaneamente un gruppo di pezzi per ottenere un prodotto finito o un prodotto intermedio da sottoporre ad ulteriori lavorazioni. La *Figura 2-3* illustra un sistema di trattamento a lotti. I chicchi di caffè vengono scaricati da un cargo ed immagazzinati in sili. Quando sono richiesti per il trattamento, i chicchi vengono trasportati per suzione (trasporto pneumatico) attraverso condotti aventi un diametro di circa 15 cm ad una pesatrice che crea dei lotti di circa 500 chili. Ogni singolo lotto è quindi trasportato attraverso le varie fasi del processo unitariamente, e non più come flusso continuo. Dopo la torrefazione i chicchi vengono rapidamente raffreddati con acqua e trasportati pneumaticamente in altri contenitori per la miscelazione, la macinazione e l'imballaggio. In questo processo si possono individuare almeno sei processi separati di tipo a lotti; pesatura, torrefazione, raffreddamento, miscelazione, macinazione e imballaggio; ognuno di essi compie una singola operazione sul caffè, che quindi passa alla fase successiva.

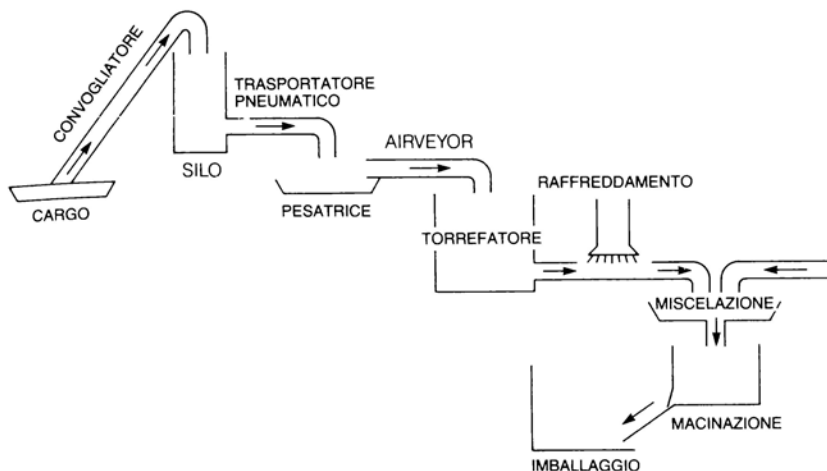



Figura 2-3. Trattamento a lotti del caffé

In ciascuna fase occorre effettuare vari controlli. Si consideri, per esempio, il processo di torrefazione. La stazione di torrefazione è costituita da un cilindro perforato che viene caricato con un lotto di chicchi; quindi l'aria calda proveniente da un bruciatore viene fatta passare attraverso i chicchi mediante un ventilatore mentre si effettua la misurazione del flusso d'aria, della sua temperatura e del contenuto di umidità. Il flusso d'aria e la temperatura vengono controllati e il processo di torrefazione continua fino a quando la misurazione del contenuto di umidità indica che i chicchi sono sufficientemente secchi. Nell'ambito di questa fase il processo di controllo può essere considerato continuo, anche se il processo totale è di tipo a lotti.

Fabbricazione di parti separate

È il più comune fra tutti i sistemi, e riguarda la fabbricazione di prodotti mediante una serie di operazioni, numerose delle quali sono fra loro simili. Questo tipo di processo, in cui il pezzo da lavorare è una parte singola che deve essere trattata su base individuale, è differente da quello a lotti, in cui i prodotti in uscita da una fase normalmente subiscono una successiva fase di trattamento a lotti prima che si ottenga il prodotto finale come nel precedente esempio del caffè.

Come esempio di trattamento di parti separate, si consideri la macchina di taglio e di foratura illustrata in *Figura 2-4*. Una tavola di legno viene posta nella macchina e l'operatore preme un interruttore a pedale per dare inizio al processo. La tavola viene bloccata in posizione e due seghe circolari si abbassano per tagliarne entrambe le estremità. Quindi le seghe arretrano e due trapani effettuano dei fori, di differente profondità, ad entrambe le estremità della tavola. Le punte dei trapani vengono fatte arretrare, e la tavola viene liberata per essere rimossa. La *Figura 2-5* mostra un particolare dell'assieme di bloccaggio, taglio e trapanatura. La tavola viene successivamente portata alla stazione seguente per operazioni come la levigatura e la verniciatura.

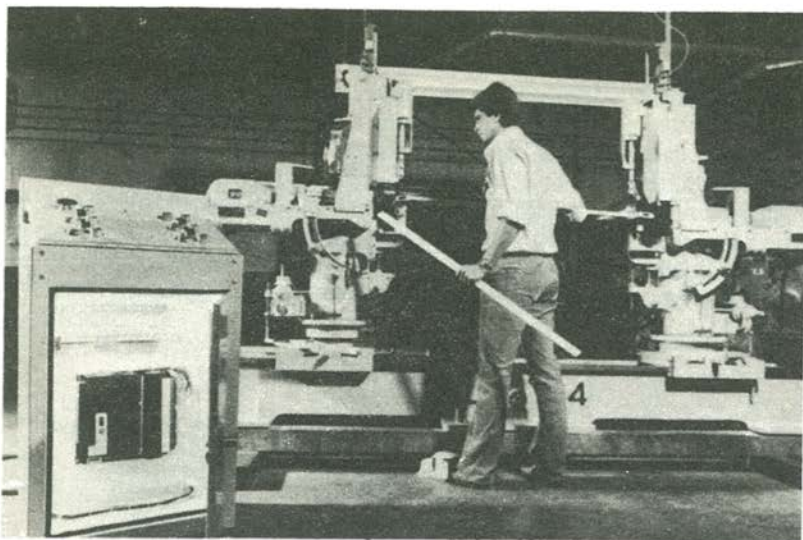



Figura 2-4. Macchina di taglio e foratura per legno (Per concessione della Colonial Wood Products)

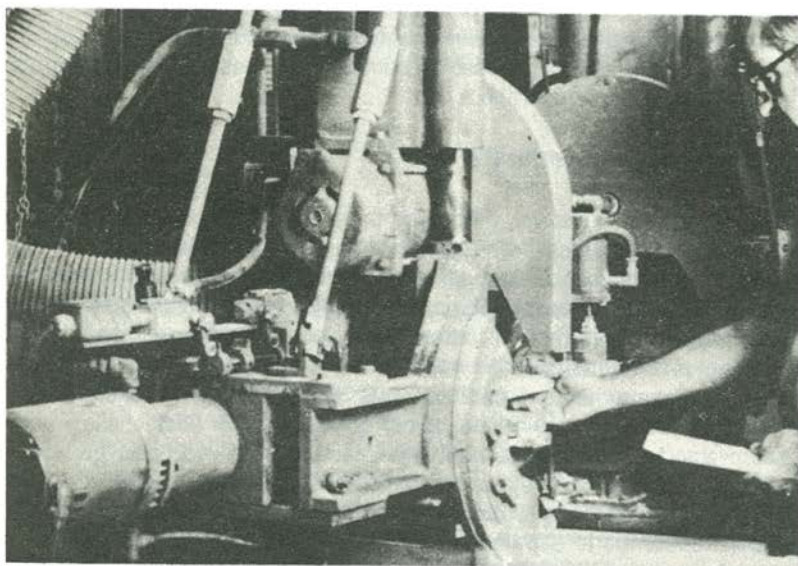



Figura 2-5. Particolare del dispositivo di bloccaggio, della sega e del trapano (Per concessione della Colonial Wood Products)

COMPONENTI DI UN SISTEMA DI CONTROLLO

Come esposto nel Capitolo 1, il cuore di un sistema di automazione è costituito dal sistema di controllo. I componenti principali di un sistema di controllo sono mostrati in *Figura 2-6* e sono suddivisi a seconda del tipo di funzione svolta; ulteriori dettagli su questi componenti verranno forniti successivamente.

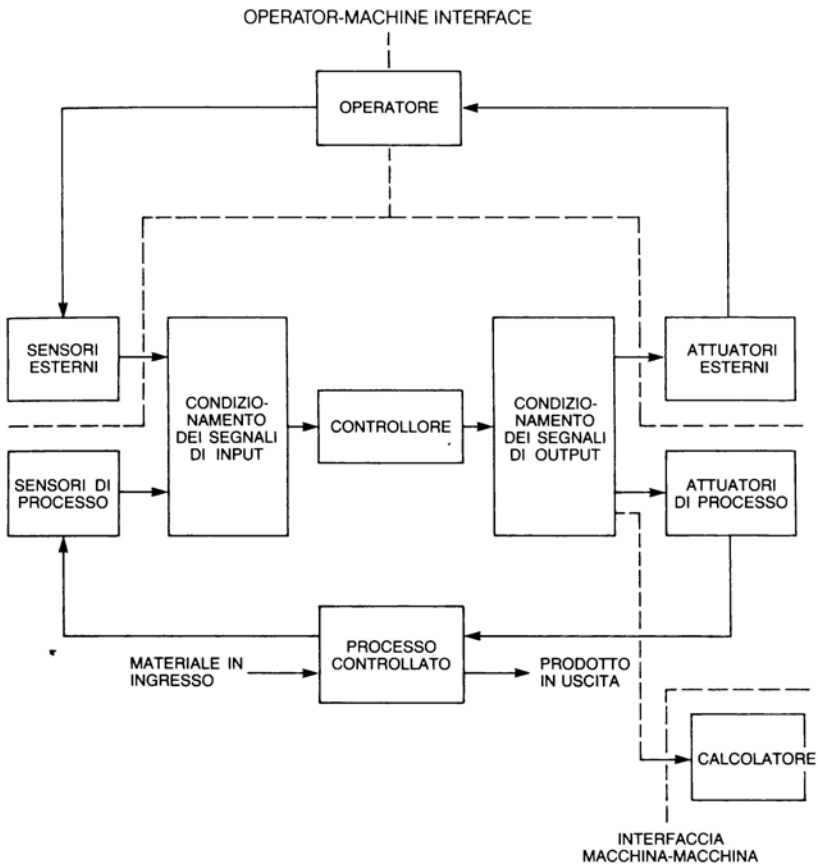



Figura 2-6. Sistema generale di controllo

Sensori

La prima funzione di un sistema di controllo consiste nel rilevare input, ovvero segnali di ingresso, dal processo e dall'ambiente esterno mediante sensori. I sensori sono un tipo di trasduttore che converte in segnali elettrici talune informazioni fisiche, come pressioni, temperatura, portata, posizione, ecc. I segnali elettrici sono correlati in modo

noto alla variabile fisica, cosicché possono essere usati per verificare e comandare un processo.

Generalmente i sensori vengono suddivisi in varie categorie in funzione di ciò che possono misurare. Per i processi continui sono sovente necessarie una o più delle seguenti quantità:

1. Flusso
2. Temperatura
3. Pressione
4. Velocità
5. Accelerazione

Per i trattamenti a lotti possono essere necessarie una o più delle seguenti quantità:

1. Livello
2. Composizione
3. Peso
4. Volume
5. Tensione
6. Compressione
7. Posizione
8. Dimensione

Per la fabbricazione di parti separate, i sensori misurano essenzialmente condizioni di ON/OFF, o tutto/niente.
È da rilevare che gli elenchi sopra riportati sono di tipo generico, e che un sensore indicato per un tipo di processo può essere facilmente presente in qualsiasi altro tipo di processo.

Input esterni

Gli input esterni sono immessi da un operatore, che imposta le condizioni di partenza o altera il controllo di un processo. Possono includere un arresto di emergenza, una variazione di velocità, il tipo di processo da effettuare, il numero di pezzi da trattare o altro. Per gli input da parte dell'operatore sono usati vari tipi di commutatori, controlli variabili e tastiere. Questa è la cosiddetta interfaccia operatore/macchina. Anche la temperatura, la pressione e l'umidità dell'ambiente esterno possono essere misurate ed usate per alterare il processo di controllo; per esempio, i cambiamenti di temperatura e di umidità relativa nell'ambiente in taluni processi possono richiedere variazioni nel tempo e nella temperatura di essiccazione.

Condizionamento dei segnali

La seconda delle funzioni generali è un tipo di condizionamento dei segnali. Il segnale elettrico di input prodotto da un sensore generalmente non ha una forma tale da consentire un suo impiego diretto da parte di un controllore.
Una comune tecnica di condizionamento dei segnali è l'amplificazione, poiché i segnali sovente non hanno la tensione, la corrente o la potenza richieste. Un'altra tecnica comune è la filtrazione dei segnali per variare il loro contenuto in termini di frequenza. Quando si usa un controllore digitale, la forma dei segnali può richiedere di essere convertita da un segnale variabile con continuità a un segnale rappresentato da livelli discreti, o viceversa.
Analogamente, i segnali elettrici di output, ovvero in uscita, dal controllore spesso devono essere condizionati in termini di ampiezza o di forma per poter azionare correttamente gli attuatori. Anche in questo caso l'amplificazione è molto comune,

poiché l'uscita del controllore solitamente è costituita da un segnale a basso livello di tensione e di corrente, mentre gli attuatori di norma richiedono un'elevata tensione e/o corrente.

Attuatori

La terza funzione generale è quella di produrre azioni di uscita. I dispositivi che convertono un segnale elettrico di controllo in un'azione fisica sono denominati attuatori o azionatori. Per i processi continui gli attuatori solitamente sono valvole di controllo del flusso, pompe e posizionatori. Per i processi di tipo a lotti vengono usati attuatori a velocità variabile, innesti e freni. Per la fabbricazione di parti separate, possono essere necessari solenoidi, motori a passi, commutatori a passi e relè di potenza. Anche questo elenco è di tipo generale, poiché in pratica qualsiasi attuatore può essere usato in qualsiasi tipo di processo.

Output esterni

Solitamente è desiderabile che il controllore indichi all'operatore lo stato del processo o il valore di talune variabili del processo stesso. I dispositivi utilizzabili per questo scopo possono essere un indicatore a quadrante, uno schermo a raggi catodici, una stampatrice, un campanello, una lampada o un altro dispositivo al quale l'operatore possa reagire; questa è un'interfaccia macchina-operatore. Gli output possono anche andare direttamente dal controllore ad un elaboratore che memorizza i dati e analizza i risultati; questa è un'interfaccia macchina-macchina.

Controllore

La quarta funzione generale è quella del controllo. Il cervello del sistema di controllo è il controllore, o unità di controllo. Questa unità riceve gli input dai sensori e dai dispositivi esterni ed effettua dei calcoli matematici e dei confronti logici per decidere le azioni da intraprendere, e quindi genera i corretti segnali di output per gli attuatori che eseguiranno materialmente la decisione. Il controllore solitamente è costituito da combinazioni di amplificatori, filtri e circuiti digitali, ivi inclusi dispositivi logici e microprocessori. La progettazione del controllore non rientra fra gli scopi di questo volume, che si limita ad esporre come si possono usare alcuni tipi di controllori per automatizzare i processi.

Esempio di uso di componenti

I controlli "automatici" di dispositivi non sono una novità in senso assoluto. Un antico esempio illustra i componenti di un sistema di controllo. Un imperatore romano aveva progettato un sistema per far aprire «in modo magico» le porte di un tempio al suo avvicinarsi; questo sistema è illustrato in *Figura 2-7*. Mentre l'imperatore si avvicinava, qualcuno accendeva il fuoco sull'altare. L'aria contenuta nel serbatoio nascosto sotto l'altare si riscaldava e si espandeva facendo travasare in un recipiente sospeso una parte dell'acqua contenuta in un serbatoio chiuso a tenuta stagna. Il recipiente sospeso riempiendosi diventava più pesante di un contrappeso e scendeva lentamente aprendo

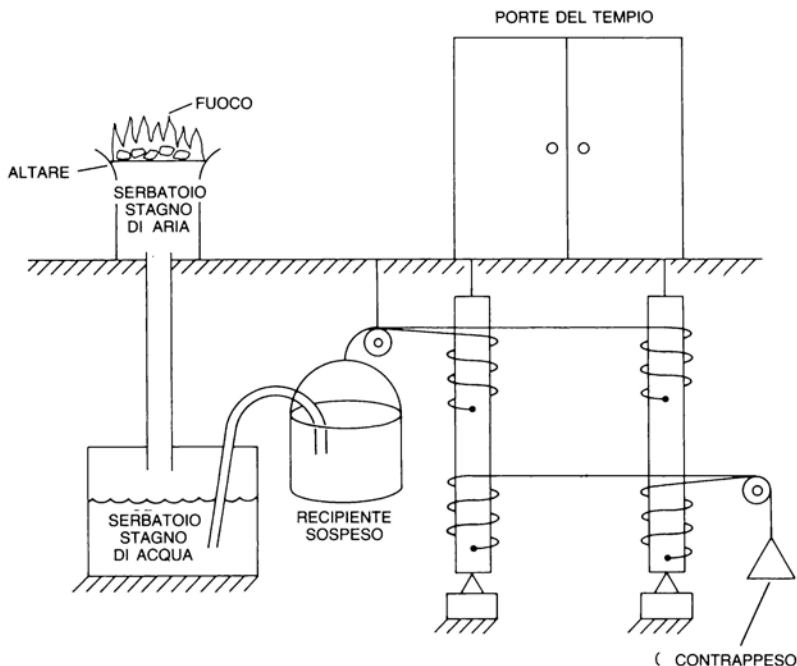



Figura 2-7. Sistema di controllo dell'imperatore

le porte. Quando l'imperatore lasciava il tempio veniva spento il fuoco, l'aria si raffreddava e l'acqua era risucchiata nel serbatoio chiuso; in tal mondo il recipiente sospeso diventava più leggero e il contrappeso richiudeva le porte.
In questo esempio, il sensore era la persona che vedeva avvicinarsi l'imperatore e accendeva il fuoco; il fuoco era il condizionatore di segnale che cambiava l'osservazione visiva in un appropriato segnale di controllo; l'aria calda era il segnale di input per il controllore, che era costituito dal serbatoio chiuso, dall'acqua e dal recipiente sospeso; le pulegge, la fune, i pali girevoli e il contrappeso erano gli attuatori.

TIPI DI SEGNALI NEI SISTEMI DI CONTROLLO

Per gli scopi di questo libro, tutti i sistemi di controllo possono essere suddivisi in due categorie: analogici o digitali. Se i segnali che entrano od escono dal controllore sono variabili con continuità, il sistema di controllo è chiamato analogico. Viceversa, se i segnali che entrano e escono dal controllore possono assumere soltanto due stati, identificati da due differenti livelli di tensione o di corrente, il sistema è chiamato digitale. Queste definizioni verranno ora analizzate in maggiore dettaglio.

Segnali analogici

Il livello, o ampiezza, dei segnali analogici può variare con continuità nel tempo; può cioè assumere un numero infinito di valori compresi fra un limite massimo e un limite minimo. La *Figura 2-8* rappresenta un comune segnale analogico, chiamato onda sinusoidale poiché la sua forma è descritta dalla funzione matematica seno. Questo segnale è detto periodico poiché la forma d'onda si ripete ogni T secondi; l'intervallo di tempo in secondi, T, è il periodo del segnale.
Dividendo 1 per l'intervallo di tempo si ottiene la frequenza del segnale, che viene designata dalla lettera f; analogamente, se la frequenza di un segnale è nota, dividendo I per la frequenza si ottiene il periodo. Pertanto:

$$f = \frac{1}{T} \text{ inoltre } T = \frac{1}{f}$$

La frequenza indica quante volte il segnale si ripete in un secondo, ovvero quanti sono i cicli al secondo. L'unità di frequenza è l'hertz (Hz) e 1 Hz corrisponde a 1 ciclo al secondo. La corrente elettrica alternata disponibile nelle abitazioni è una sinusoide che in Italia ha una frequenza di 50 Hz; questa è comunemente chiamata corrente alternata a 50 cicli.

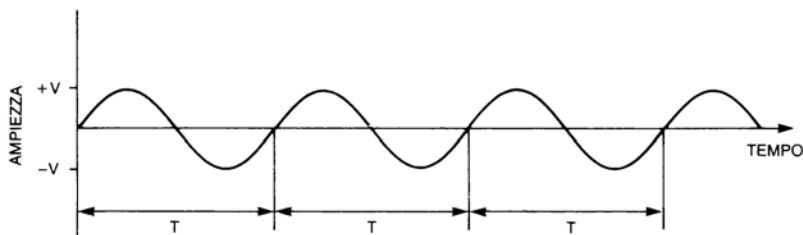



Figura 2-8. Un segnale continuo periodico — La sinusoide

Non tutti i segnali continui sono periodici, e non tutti i segnali periodici sono sinusoidali, ma tutti possono essere descritti in termini di sinusoidi. Questo è molto importante, poiché consente di esprimere il contenuto in frequenza di un segnale in termini di sinusoidi. Un filtro è un dispositivo previsto per bloccare alcune componenti di un segnale e lasciarne passare altre di frequenza differente. I ricevitori per radio e televisione, per esempio, contengono un filtro accordabile che consente al segnale della stazione prescelta di passare mentre tutti gli altri segnali di frequenza differente vengono bloccati.
La maggior parte dei sensori genera segnali analogici e ciò facilita il loro collegamento ad un controllore analogico (se necessario attraverso condizionatori di segnali). La frequenza del segnale generato dai sensori può coprire una banda che si estende da poco meno di 1 hertz a migliaia di hertz, tuttavia nei sistemi di controllo degli impianti di fabbricazione il segnale dei sensori normalmente varia con una frequenza di pochi hertz. Un'onda radio, viceversa, ha una frequenza compresa fra centinaia di migliaia e milioni di hertz.

Segnali digitali

I segnali digitali usati nei sistemi di controllo hanno soltanto due livelli possibili. Questi segnali possono essere rappresentati in forma numerica assegnando il numero di riferimento «1» ad un livello e «0» all'altro; questi due valori formano un sistema binario (in base 2). I circuiti elettronici digitali operano su livelli di tensione, e i livelli rappresentati da 0 e da 1 possono essere diversi fra un sistema e un altro. Per esempio, un sistema può utilizzare il livello di +0,4 volt per lo 0 e un livello di +2,4 volt per l'1, mentre un altro sistema può usare un livello di -0,4 volt per lo 0 e un livello di +0,4 volt per l'1. Questo, tuttavia, ha importanza soltanto per il progettista del circuito o per il riparatore, e quando si analizzano segnali digitali e le informazioni che essi rappresentano è pressoché universalmente utilizzata la rappresentazione numerica binaria. Pertanto, quando si rappresentano su un diagramma delle forme d'onda digitali e i loro livelli di tensione non sono importanti, lo 0 binario viene rappresentato al livello 0 dell'asse Y e l'1 binario ad un livello positivo arbitrario, come rappresentato in *Figura 2-9.*

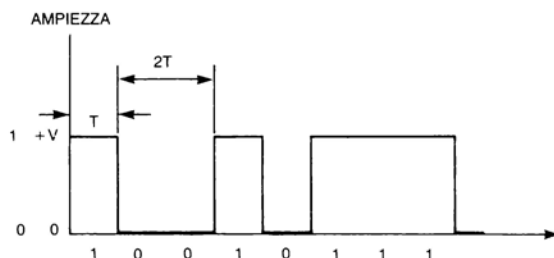



Figura 2-9. Un segnale digitale e la sua rappresentazione binaria

I segnali digitali, al pari di quelli analogici, hanno un periodo e una frequenza, ma il loro periodo viene misurato in modo differente. Come illustrato in *Figura 2-9*, per un segnale digitale il periodo T è il tempo in cui il livello di un numero binario resta costante. Un numero binario viene chiamato bit, dalla contrazione delle parole inglesi *b*inary dig*it*. Il periodo T varia fra un sistema e l'altro, ma per ciascun sistema deve trovarsi entro limiti specificati. La frequenza è, anche in questo caso, il reciproco del periodo (1/T), e viene misurata in bit per secondo (bps).

Poiché un bit può rappresentare soltanto due condizioni (1 o 0, ON o OFF, A o B, ecc.) quando sono necessarie varie condizioni devono essere adoperati più bit raggruppati in modo da formare un codice; ogni combinazione di bit che può essere formata rappresenta una delle differenti condizioni e viene chiamata byte. Un byte comunemente usato nei sistemi digitali ha 8 bit; in *Figura 2-9* è rappresentato uno di questi byte. Questa particolare combinazione di bit può essere rappresentata scrivendo i valori 0 e 1 come numero binario 10010111. Un codice a 8 bit può avere 256 differenti combinazioni e può rappresentare 256 differenti condizioni.

Se i sensori e gli attuatori di un sistema di controllo generano o usano dei segnali analogici, ma il controllore opera con segnali digitali, il condizionamento dei segnali fra i sensori e il controllore viene effettuato da un convertitore analogico-digitale, e quello

fra il controllore e l'attuatore viene effettuato da un convertitore digitale-analogico; queste unità, come i nomi stessi suggeriscono, convertono un segnale da una forma all'altra, e verranno meglio analizzate nel Capitolo 4.

STRUTTURA DEI SISTEMI DI CONTROLLO

Sinora in questo capitolo sono stati analizzati i tipi di processi che possono richiedere un controllo (continuo, a lotti, a parti separate) e i tipi i sistemi disponibili per effettuare la funzione di controllo (analogici o digitali). Verranno ora esaminati i metodi per controllare un sistema e le caratteristiche di funzionamento del sistema che dipendono da questi metodi.
Lo schema a blocchi mostrato in *Figura 2-6* descrive in modo generale un sistema di controllo; in tale schema sono presenti tutti gli elementi tipici di un sistema di controllo, ma questi elementi non sono descritti. Il sistema rappresentato nella figura è del tipo ad anello chiuso e la maggior parte degli esempi che verranno analizzati sarà di questo tipo, ma per meglio comprendere i sistemi ad anello chiuso è opportuno considerare anzitutto un sistema ad anello aperto. Questo tipo di sistema è meno complesso ma si presta a numerose applicazioni.

Sistema ad anello aperto

La *Figura 2-10* rappresenta un tipico sistema di controllo ad anello aperto (open loop). Il processo è controllato immettendo nel controllore le condizioni che si ritengono necessarie per ottenere il risultato desiderato e accettando qualsiasi risultato si ottenga. La cottura di un arrosto in un forno con un controllo a tempo mentre si è assenti da casa è un esempio di sistema ad anello aperto. L'arrosto viene posto nel forno, vengono impostate le condizioni di tempo e temperatura per la cottura, e quindi l'arrosto viene tolto dal forno al rientro a casa. Gli input per il sistema di controllo sono le regolazioni di tempo e di temperatura, il controllore è costituito da un sistema ad orologeria e da un termostato che determina quando il forno deve essere acceso o spento, gli attuatori sono gli interruttori che controllano l'alimentazione di elettricità all'elemento riscaldatore (o la valvola che controlla il flusso di carburante ad un bruciatore), il processo è la cottura e il prodotto ottenuto è l'arrosto. Per questo semplice controllore non è richiesto alcun condizionamento di segnale.

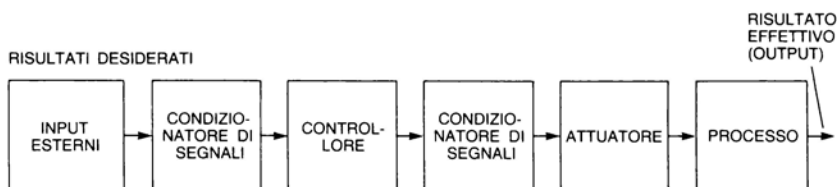



Figura 2-10. Un sistema di controllo ad anello aperto

Si confronti la *Figura 2-10* con la *Figura 2-6* e si noti che i sensori del processo e il collegamento di retroazione (feedback) nella *Figura 2-10* mancano, poiché si tratta di un sistema ad anello aperto. In un sistema di questo tipo nessuna informazione viene riportata al controllore per determinare se i risultati ottenuti sono quelli desiderati; a causa di ciò possono verificarsi dei notevoli errori nell'output. Nell'esempio del forno, l'arrosto può essere troppo o poco cotto.

Sistema ad anello chiuso

In un sistema ad anello chiuso (closed loop) l'output effettivo del processo viene misurato e confrontato con quello desiderato, e il sistema di controllo apporta delle correzioni fino a quando la differenza fra l'output desiderato e quello effettivamente ottenuto è inferiore a un valore prestabilito. La *Figura 2-11* rappresenta un tipico sistema ad anello chiuso. I condizionatori di segnale e gli attuatori non sono rappresentati per motivi di semplicità e, qualora siano necessari, si può considerare che facciano parte del blocco del controllore.

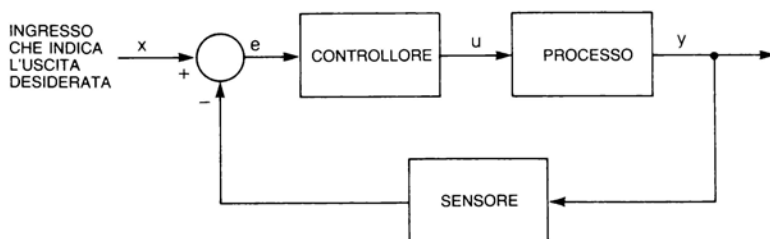



Figura 2-11. Tipico sistema ad anello chiuso

Si noti che in questo sistema l'output effettivo viene rilevato e retroazionato (di qui il nome «controllo a retroazione») per essere sottratto dall'input che indica l'output desiderato. Se fra i due vi è una differenza, un segnale inviato al controllore fa sì che quest'ultimo agisca in modo da cambiare l'output effettivo sino a quando la differenza si annulla. Nel precedente esempio di cottura dell'arrosto, se nella carne fosse stato inserito un termometro (sensore), se il forno fosse stato regolato a una temperatura predertemінata, se l'arrosto fosse stato cotto fino a quando il termometro inserito nella carne avesse indicato (in base alle misurazioni del sistema di controllo) la temperatura di 60°C e poi il forno fosse stato spento, il sistema di controllo sarebbe stato del tipo ad anello chiuso. Gli input esterni sarebbero stati l'ora di accensione, la temperatura del forno e la temperatura desiderata della carne.
L'input per il sistema di controllo sarebbe stato la differenza fra la temperatura reale e quella desiderata della carne. Quando questa temperatura si fosse annullata, il controllore avrebbe spento il forno. In pratica, il controllore avrebbe dovuto prevedere che un'ulteriore cottura si sarebbe verificata dopo lo spegnimento del forno e avrebbe dovuto interrompere il riscaldamento quando era ancora presente una certa differenza di

temperatura, per esempio di 1°C. Questo esempio pone in risalto che in un processo ad anello chiuso sono possibili differenti livelli di controllo.
Il sistema automatico di *Figura 2-12a* è un altro esempio di processo ad anello chiuso. Un contenitore vuoto viene portato in posizione dal sistema di trasporto di entrata, inizia il riempimento e viene misurato il peso del contenitore e del contenuto. Quando il peso raggiunge il valore desiderato, il riempimento viene interrotto, il contenitore pieno viene fatto avanzare sul trasportatore di uscita e il successivo contenitore vuoto viene portato in posizione; il processo quindi viene ripetuto.
Lo schema a blocchi del sistema di controllo è rappresentato in *Figura 2-12b*. Un sensore collegato alla bilancia che pesa il contenitore genera un segnale di tensione o un codice digitale che rappresenta il peso del contenitore e del contenuto; questo viene sottratto dal segnale di tensione o dal codice digitale che è stato prefissato per indicare il peso desiderato. Finché la differenza è maggiore di zero, il controllore mantiene aperta la valvola; quando la differenza si annulla, la valvola viene chiusa. Questo tipo di sistema è particolarmente utile per operazioni di riempimento in cui il peso del materiale che viene posto nel contenitore non è correlato direttamente al volume del materiale (prodotti cerealicoli e patatine sono esempi di questo genere).

b) Schema a blocchi

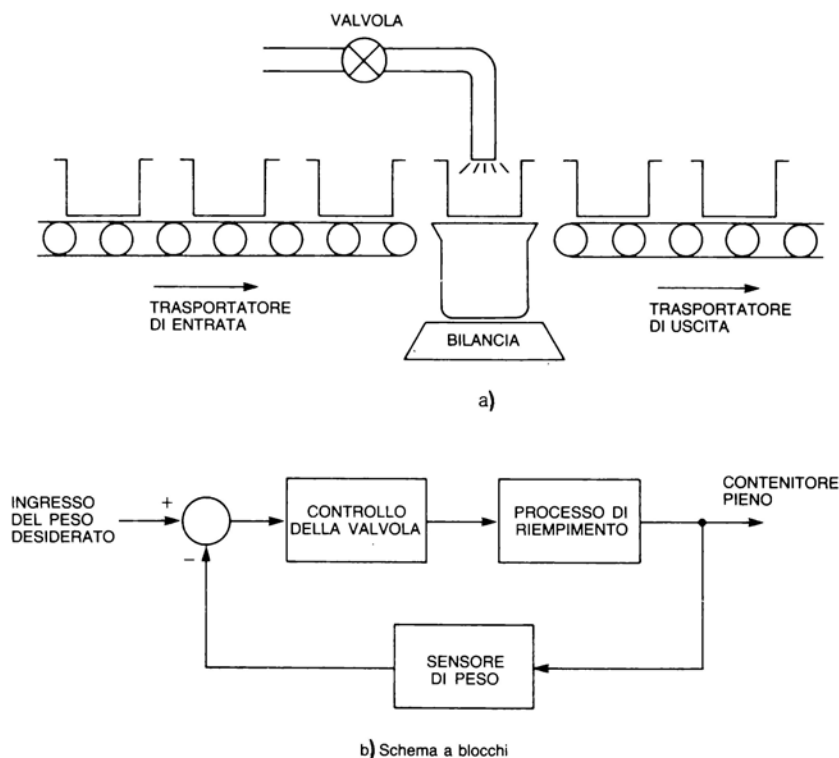



Figura 2-12. Sistema di riempimento di contenitori

Quando si pensa a questo sistema possono sorgere vari interrogativi, poiché parecchie azioni devono accadere ed essere tenute sotto controllo per effettuare quest'operazione relativamente semplice. Per esempio, le cinghie del trasportatore devono essere controllate per avviare, spostare e fermare in posizione il contenitore; il sistema di controllo richiede un input a sensore che indichi quando il contenitore è in posizione per il riempimento; deve essere lasciato passare un certo tempo affinché la bilancia si assesti prima di iniziare la lettura del peso; devono essere previsti alcuni mezzi per spostare il contenitore dal trasportare di ingresso alla bilancia e da quest'ultima al trasportatore di uscita. Tutti questi problemi possono essere affrontati facilmente con i controllori che vengono descritti in questo libro. Lo schema a blocchi del sistema di controllo sarà un po' più complesso di quelli sinora considerati, ma non sarà difficile da capire. Per ora, tuttavia, è importante comprendere cosa sia presente nei sistemi di base ad anello aperto e ad anello chiuso.
L'impiego di sistemi di controllo ad anello chiuso non è del tutto privo di inconvenienti. Oltre ad essere più complessi e costosi di quelli ad anello aperto, questi sistemi possono produrre in uscita delle oscillazioni di ampiezza crescente. Un sistema di questo tipo è detto instabile, e se gli viene consentito di continuare ad operare in questo modo solitamente si autodistruggerà. Questa e altre caratteristiche dei sistemi ad anello chiuso verranno analizzate in seguito.

TEORIA E FONDAMENTI DEI SISTEMI DI CONTROLLO

Si faccia nuovamente riferimento alla *Figura 2-11*. Le prestazioni del sistema saranno analizzate con riferimento ai simboli riportati nella figura. La variabile di output y del processo deve adattarsi all'input x, e il sistema cercherà di raggiungere questo scopo calcolando l'errore, $e = (x - y)$, e generando un segnale di ingresso di processo, u, basato sul valore dell'errore. Il funzionamento del sistema viene misurato in base a standard (criteri) del seguente tipo:
1: La rapidità con la quale la variabile di output, y, del processo risponde ad una variazione di input, x.
2. L'errore, e, fra il segnale di input, x, e la variabile di output, y, del processo dopo un determinato periodo di tempo.
3. La stabilità del sistema.
4. La sensibilità del sistema ai disturbi.
Per un controllo di processo di sistemi continui e a lotti, il controllore solitamente sarà di uno dei seguenti quattro tipi:
1. Proporzionale.
2. Proporzionale-integratore.
3. Proporzionale-derivatore.
4. Proporzionale-integratore-derivatore (a tre modi). Il tipo 1 è il più semplice e meno accurato, mentre il tipo 4 è il più complesso ed accurato.

La risposta ai transitori

Quando l'input x di un sistema di controllo viene improvvisamente cambiato, l'output y avrà una certa risposta nel tempo, chiamata risposta ai transitori. Questa risposta avrà uno dei tre andamenti generali rappresentati in *Figura 2-13.* Se l'input cambia rapidamente da 0 a 1, l'output tende a raggiungere il valore 1 in un certo tempo.

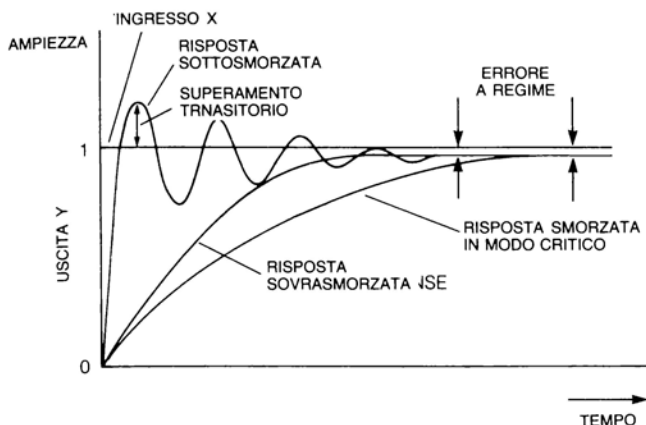



Figura 2-13. Tipi di risposta ai transitori

Il primo tipo di risposta è chiamato risposta sottosmorzata. L'output y supera il valore indicato dall'input, quindi scende al di sotto di questo valore e finalmente si stabilizza ad un valore prossimo a quello di input; questa risposta è di tipo oscillante. Una seconda risposta possibile è quella sovrasmorzata, in cui l'output y non supera mai il valore richiesto dall'input, ma richiede un tempo relativamente lungo per raggiungere il suo valore finale. Il terzo tipo è la risposta smorzata in modo critico, in cui l'output y raggiunge il suo valore finale nel minimo tempo possibile senza che si provochi un superamento del valore indicato dall'input x.
Sia i sistemi di controllo meccanico che quelli di controllo elettrico hanno delle proprie caratteristiche di risposta nel tempo. Lo smorzamento meccanico di un sistema di sospensioni per automobile è un esempio comune di queste caratteristiche. Un'automobile sportiva dalle sospensioni rigide può essere sovrasmorzata, mentre un'automobile con ammortizzatori scarichi è nettamente sottosmorzata.
Alcuni processi possono tollerare oscillazioni attorno al valore finale senza effetti negativi, mentre altri possono richiedere che l'output non superi mai il valore di input. Il controllore deve essere scelto o regolato in modo da ottenere il tipo di risposta richiesta.

Errore a regime

Dopo il periodo transitorio, per ogni dato input x verrà raggiunto un valore di regime dell'output y. La differenza fra l'output finale a regime e il valore indicato dall'input è chiamata errore a regime o deviazione statica; quest'errore per un input di posizione è rappresentato in *Figura 2-13*.

Stabilità

Se per un dato input o per un dato disturbo la risposta ai transitori del sistema è tale che l'output a regime è simile a quello rappresentato in *Figura 2-13*, il sistema è detto stabile. Se il sistema è instabile, l'uscita continuerà ad aumentare al di là di ogni limite sino a quando il sistema si autodistruggerà, a meno che siano previsti dei circuiti di sicurezza per interrompere il funzionamento del sistema. Per esempio, il 7 novembre 1944 il primo ponte sullo stretto di Tocoma a Puget Sound, Washington, venne assoggettato a una raffica di vento (disturbo) e cominciò ad oscillare con ampiezza crescente fino a spezzarsi.

Sensibilità

La sensibilità di un sistema è il rapporto fra il cambiamento percentuale dell'output y e il cambiamento percentuale negli input del sistema stesso. Questi input possono essere di tipo normale o possono essere dei disturbi indesiderati, come cambiamenti nei parametri del processo dovuti all'invecchiamento, all'ambiente, ad una regolazione inadatta, ecc. I sistemi ad anello chiuso sono molto meno sensibili a questi cambiamenti che non i sistemi ad anello aperto, poiché i sistemi ad anello chiuso controllano l'output e possono compensare questi cambiamenti. Se sono necessari dei sistemi ad anello aperto molto accurati (con ridotto errore a regime), i componenti del sistema devono essere scelti molto attentamente e il costo del sistema va alle stelle.

Tipi di sistemi

I tre tipi di sistemi che saranno analizzati sono:

Tipo 0: Un segnale di input costante x dà luogo ad un valore costante (posizione costante) della variabile di output controllata y.

Tipo 1: Un segnale di input costante x dà luogo ad un cambiamento costante del valore (velocità costante) della variabile di output y.

Tipo 2; Un segnale di input costante x dà luogo ad un'accelerazione costante della variabile di output y.

Il tipo di sistema viene determinato sia dal controllore che dal processo. L'esempio illustrato in *Figura 2-12* è un sistema di tipo 1, poiché un input costante x dà luogo ad un flusso (velocità) costante di materiale per il riempimento del contenitore. Ogni tipo di sistema ha una differente risposta a regime.

Tipo 0

In *Figura 2-14a* viene indicata la risposta a regime di un sistema di tipo 0 quando si verifica una variazione di input a gradino. Se il sistema ha un guadagno K, l'errore a regime e_r per un input a gradino di valore A è:

$$e_r = \frac{A}{1 + K}$$

Quanto maggiore è il valore di K tanto minore sarà l'errore, ma grandi valori di K possono rendere instabile il sistema. Se l'input di un sistema di tipo 0 è un input di velocità o di accelerazione, l'output non può seguirlo, e col passare del tempo l'errore a regime aumenta e raggiunge un valore infinito.

a. Sistema di tipo 0

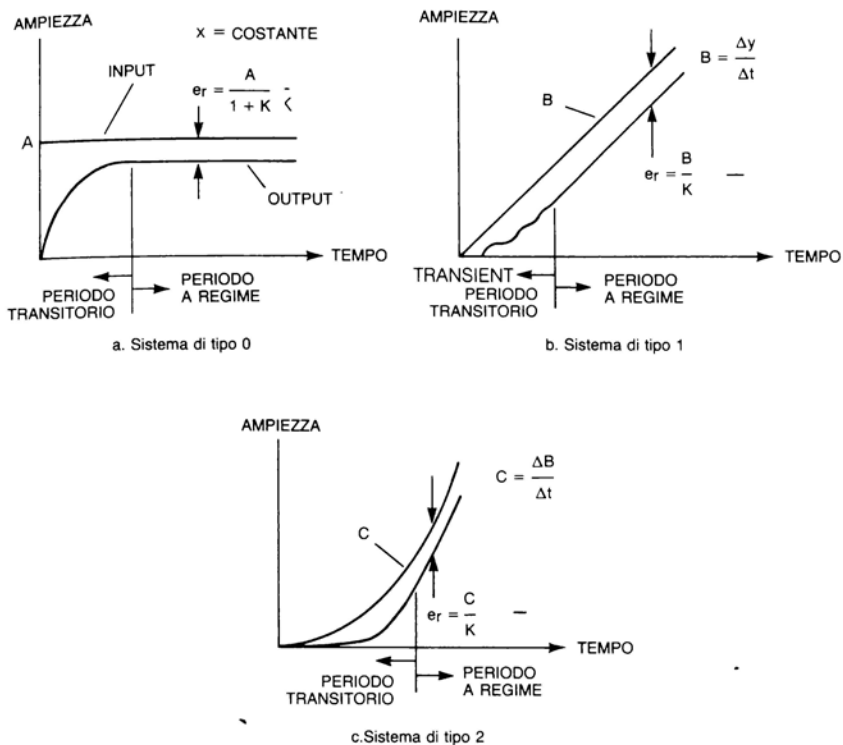
b. Sistema di tipo 1

c.Sistema di tipo 2

Figura 2-14. Errore a regime per differenti tipi di sistemi

Tipo 1

L'errore a regime che si verifica in un sistema di tipo 1 per un input a gradino è nullo, e questa è la situazione desiderata. In *Figura 2-14b* è rappresentato l'errore a regime di un sistema di tipo 1 dovuto a un input a rampa di ampiezza B. Indicando ancora con K il guadagno del sistema, l'errore a regime, e_r, sarà:

$$e_r = \frac{B}{K}$$

Come nel precedente caso, aumentando K diminuisce l'errore a regime. Un sistema di tipo 1 non può seguire un input di accelerazione, e l'errore a regime per un input di questo tipo aumenta all'infinito con il passare del tempo.

Tipo 2

Un sistema di tipo 2 ha un errore a regime nullo sia per input di posizione che di velocità. Se l'input è un valore di accelerazione C, l'errore a regime, e_r, è rappresentato in *Figura 2-14c* ed è calcolabile con la formula:

$$e_r = \frac{C}{K}$$

Anche in questo caso, aumentando K diminuisce l'errore a regime.
Verranno ora considerati i differenti tipi di controllori usabili per migliorare la risposta del sistema.

Tipi di controllori

Controllori proporzionali

Un controllore proporzionale regola semplicemente il guadagno K del sistema. Se il processo ha un guadagno K_p e il controllore ha un guadagno K_c, il guadagno del sistema è: $K = K_c K_p$
Se a causa del guadagno K_p il sistema è instabile, si dovrà scegliere un valore K_c inferiore all'unità, in modo che il guadagno K del sistema dia luogo ad un sistema stabile. Viceversa, se la stabilità non costituisce un problema, si può essere un controllore proporzionale ad aumentare il guadagno fino a quando l'errore a regime viene riportato entro il limite desiderato.

Controllore proporzionale-integratore

Un controllore proporzionale-integratore (PI) (chiamato anche compensatore a ritardo) regola il guadagno del sistema come un controllore proporzionale e aumenta di 1 il tipo di sistema. Pertanto, se a un processo di tipo 1 viene aggiunto un controllore PI, il sistema risulta di tipo 2. Come indicato nella *Tabella 2-1*, aumentando il tipo del sistema aumentano i tipi di input che possono essere accettati dal sistema stesso senza generare errori a regime inaccettabili.

Tabella 2-1. Errore a regime in funzione del tipo di sistema e del tipo di input

	Tipo di sistema		
Tipo di input	**0**	**1**	**2**
posizione, A	$\frac{A}{1 + K}$	0	0
velocità, B	Infinito	$\frac{B}{K}$	0
accelerazione, C	Infinito	Infinito	$\frac{C}{K}$

Controllore proporzionale-derivatore

Il controllore proporzionale-derivatore (PD) (chiamato anche compensatore ad anticipo) permette di variare la risposta del sistema ai transitori. L'uso di un controllore PD correttamente progettato può trasformare un sistema sottosmorzato in un sistema smorzato in modo critico o sovrasmorzato, o viceversa, entro i limiti richiesti dal processo stesso. Come negli altri controllori proporzionali, il guadagno può essere cambiato per alterare la stabilità e l'errore a regime. Il tipo di sistema cambia come con il controllore PI, ma questo sistema da solo non è molto usato.

Controllore proporzionale-integratore-derivatore

Il controllore proporzionale-integratore-derivatore (PID), o unità a tre modi, è una combinazione dei tre tipi di controllori analizzati in precedenza. Consente cambiamenti di guadagno, di tipo di sistema e di risposta ai transitori per migliorare il funzionamento del processo. La determinazione del guadagno del sistema per raggiungere la stabilità e ottenere al tempo stesso la risposta desiderata diventa più difficile all'aumentare della complessità del sistema; inoltre, quando vengono aggiunte delle nuove funzioni solitamente viene richiesto un hardware più complesso.

CONTROLLORI PER PROCESSI DI PARTI SEPARATE

Nella fabbricazione di parti separate, il controllo del processo solitamente comporta l'azionamento o il disinserimento in sequenza per un dato periodo di tempo di vari componenti (trapani, seghe, alimentatori, motori, ecc.). Numerosi segnali di input sono prodotti dalla chiusura (o apertura) dei contatti di vari interruttori a relè azionati da una persona, dal processo stesso o dai temporizzatori. Alcuni input per i commutatori controllati dal processo vengono da vari sensori che misurano temperatura, flusso, ecc. I programmi di controllo per questi processi di inserimento-disinserimento e avviamento-arresto sono solitamente sviluppati usando un diagramma logico a scala. Questo diagramma indica le condizioni di collegamento alla sorgente di alimentazione per ciascuno dei componenti del processo. I diagrammi a scala e i controllori saranno trattati in dettaglio nei Capitoli 5, 6 e 8.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. Esistono tre tipi di processi che possono richiedere un controllo: continui, a lotti e a parti separate.
2. Si possono usare controllori analogici o digitali. Quelli analogici interfacciano facilmente i sensori e gli attuatori, ma sono più difficilmente adattabili ai cambiamenti richiesti. I controllori digitali richiedono dei circuiti speciali per interfacciare i sensori e gli attuatori, ma possono facilmente essere adattati ai cambiamenti.
3. Con tutti i sistemi di controllo occorre tener conto della risposta ai transitori, dell'errore a regime, dei cambiamenti di sensibilità e della stabilità.
4. Un sistema di controllo può essere ad anello aperto o ad anello chiuso. I sistemi ad anello aperto sono meno costosi, ma quelli ad anello chiuso sono meno sensibili alle variazioni e ai disturbi e hanno un minore errore a regime.

5. Quattro tipi di controllori per sistemi continui e a lotti sono:
   a. Proporzionale (aumenta la stabilità).
   b. Proporzionale-integratore (aumenta la stabilità, riduce l'errore a regime e aumenta il numero di ingressi consentiti).
   c. Proporzionale-derivatore (regola la risposta ai transitori).
   d. A tre modi ovvero proporzionale-integratore-derivatore (combina i vantaggi dei tre tipi precedenti).
6. Per processi di fabbricazione di parti separate, possono essere usati controllori a componenti discreti o programmabili.

Quiz per il Capitolo 2

1. Un processo continuo è:
  a. sempre in funzione.
  b. usato soltanto per operazioni semplici.
  c. autonomo, nel senso che ad una estremità del processo entrano materiali grezzi e all'altra esce un prodotto identificabile.
  D. usato soltanto con controllori analogici.

2. Un processo per parti discrete è:
  a. frequentemente usato nelle attività di fabbricazione.
  b. eguale ad un processo continuo eccetto per il fatto che deve essere usato un controllore differente.
  c. solitamente una serie ripetitiva di operazioni.
  d. "a" e "c" sopra.

3. I componenti di un sistema di controllo possono includere:
  a. sensori.
  b. attuatori.
  c. amplificatori.
  d. tutto quanto sopra.

4. I controllori analogici e digitali:
  a. accettano gli stessi segnali di input.
  b. hanno lo stesso costo.
  c. accettano con equale facilità i cambiamenti.
  d. nulla di quanto sopra.

5. Se il periodo di un'onda sinusoidale è 0,001 secondo, la frequenza dell'onda è:
  a. 0,001 Hz.
  b. 1000 Hz.
  c. 10 Hz.
  d. 10.000 Hz.

6. Se la risposta ai transitori è sottosmorzata:
  a. il valore di output talvolta supererà il valore di input durante i transitori.
  b. lo stato a regime verrà raggiunto più rapidamente di quando il sistema è sovrasmorzato.
  c. la percentuale di superamento è nulla.
  d. "a" e "b" sopra.

7. L'errore a regime è:
  a. funzione della risposta ai transitori.
  b. indipendente dal tipo di input.
  c. nullo per tutti gli input con i sistemi di tipo 1.
  d. minore quando aumenta il guadagno.

8. Un controllore proporzionale-integratore:
  a. può compensare un ritardo.
  b. non ha risposta ai transitori.
  c. può aumentare il tipo di sistema.
  d. "a" e "c" sopra.

9. La stabilità:
- **a.** può essere aumentata aumentando il guadagno.
- **b.** può essere aumentata riducendo il guadagno.
- **c.** non è importante.
- **d.** nulla di quanto sopra.

10. Quale di questi tipi di controllori è il più accurato?
- **a.** proporzionale.
- **b.** proporzionale-integratore.
- **c.** proporzionale-derivatore.
- **d.** a tre modi.

11. In un sistema di tipo O, nello stato a regime:
- **a.** l'errore per un input a gradino è sempre nullo.
- **b.** l'errore per un input di velocità è sempre nullo.
- **c.** l'errore per un input di accelerazione è sempre diverso da O.
- **d.** "a" e "c" sopra.
- **e.** tutto quanto sopra.

12. Per un sistema di tipo 1 nello stato a regime:
- **a.** l'errore per un input a gradino è sempre nullo.
- **b.** l'errore per un input di velocità è sempre nullo.
- **c.** l'errore per un input di accelerazione è sempre diverso da O.
- **d.** "a" e "c" sopra.
- **e.** tutto quanto sopra.

13. Per un sistema di tipo 2, nello stato a regime:
- **a.** l'errore per un input a gradino è sempre nullo.
- **b.** l'errore per un input di velocità è sempre nullo.
- **c.** l'errore per un input di accelerazione è sempre diverso da 0.
- **d.** "a" e "c" sopra.
- **e.** tutto quanto sopra.

14. Quali dei seguenti dispositivi può essere parte di un sensore?
- **a.** termometro.
- **b.** freno.
- **c.** relè.
- **d.** innesto.

15. Quale dei seguenti dispositivi può essere parte di un attuatore?
- **a.** termometro.
- **b.** bilancia.
- **c.** barometro.
- **d.** innesto.

16. Se la risposta ai transitori di un sistema è sovrasmorzata:
- **a.** il valore dell'output supera talvolta il valore dell'input durante il periodo del transitorio.
- **b.** il valore dell'output non supera mai il valore dell'input durante il periodo del transitorio.
- **c.** il valore dell'output non si stabilizza mai.
- **d.** nulla di quanto sopra.

17. In confronto ad un sistema di controllo ad anello aperto, un sistema ad anello chiuso è:
a. più accurato.
b. più complesso.
c. più stabile.
d. tutto quanto sopra.

18, Se un'onda sinusoidale ha una frequenza di 500 Hz, il periodo in secondi della sinusoide è:
a. 500.
b. 0,005.
c. 0,02.
d. 0,002.

19. I processi generalmente usati nell'industria sono:
a. continui.
b. a parti discrete.
c. a lotti.
d. tutto quanto sopra.

20. Nei sistemi di controllo i segnali digitali:
a. possono avere tre livelli.
b. hanno valori 1 o 0 in funzione del livello di tensione.
c. hanno una frequenza misurabile in hertz.
d. hanno un andamento sinusoidale.

CAPITOLO 3

HARDWARE DEI SISTEMI DI CONTROLLO

IN QUESTO CAPITOLO

L'automazione industriale riguarda, o comporta, l'applicazione pratica di concetti e idee per migliorare la fabbricazione di un prodotto, per perfezionarlo o, in molti casi, per poterlo fabbricare. I sistemi di automazione sono stati progettati usando varie tecnologie. Le due tecnologie che in passato sono state più ampiamente utilizzate hanno fatto uso di circuiti logici a relè e di controlli peneumatici, tuttavia la disponibilità dei componenti elettronici, e particolarmente dei microprocessori, ha reso più interessante la progettazione di sistemi di automazione impieganti la tecnologia elettronica.
In questo capitolo verrà descritto l'hardware, o struttura fisica, dei sistemi di controllo elettronico. Questo hardware può essere suddiviso in tre differenti categorie: il controllore, che ha la capacità di prendere delle decisioni, i sensori, che forniscono al controllore le informazioni di entrata, e gli attuatori, che forniscono i mezzi per effettuare azioni meccaniche. L'enfasi sarà posta sui componenti usati nelle applicazioni di controllo elettronico.

RASSEGNA DEI SISTEMI DI AUTOMAZIONE

Nel Capitolo 2 è stato illustrato un sistema di controllo che riceve segnali di input da sensori, prende una decisione, fornisce un output e, in un sistema ad anello chiuso, confronta l'uscita reale con quella desiderata. Ciò ha fornito un'indicazione di tipo generale, ma non ha permesso di approfondire come può essere un sistema reale. Poiché questo capitolo riguarda l'uso di hardware reali, verrà fatto riferimento allo schema generalizzato a blocchi funzionali mostrato in *Figura 3-1*.
Come indicato dalle linee tratteggiate, il sistema consiste di tre parti principali: i sensori di input, il controllore e gli attuatori di output. Il blocco del controllore comprende anche alcuni condizionatori di segnali, come gli amplificatori e i convertitori di tipo analogico/digitale (A/D) o digitale/analogico (D/A), necessari per tradurre i segnali in una forma accettabile al controllore elettronico. In tutti i sistemi reali vi è anche un'interfaccia con l'operatore e, frequentemente, un'interfaccia con un controllore superiore, quale l'elaboratore principale dello stabilimento. Sebbene queste ultime due interfacce siano di vitale importanza per l'intero processo, esse servono soprattutto per verificare il processo o cambiarne i parametri, ma non per controllare il processo stesso.

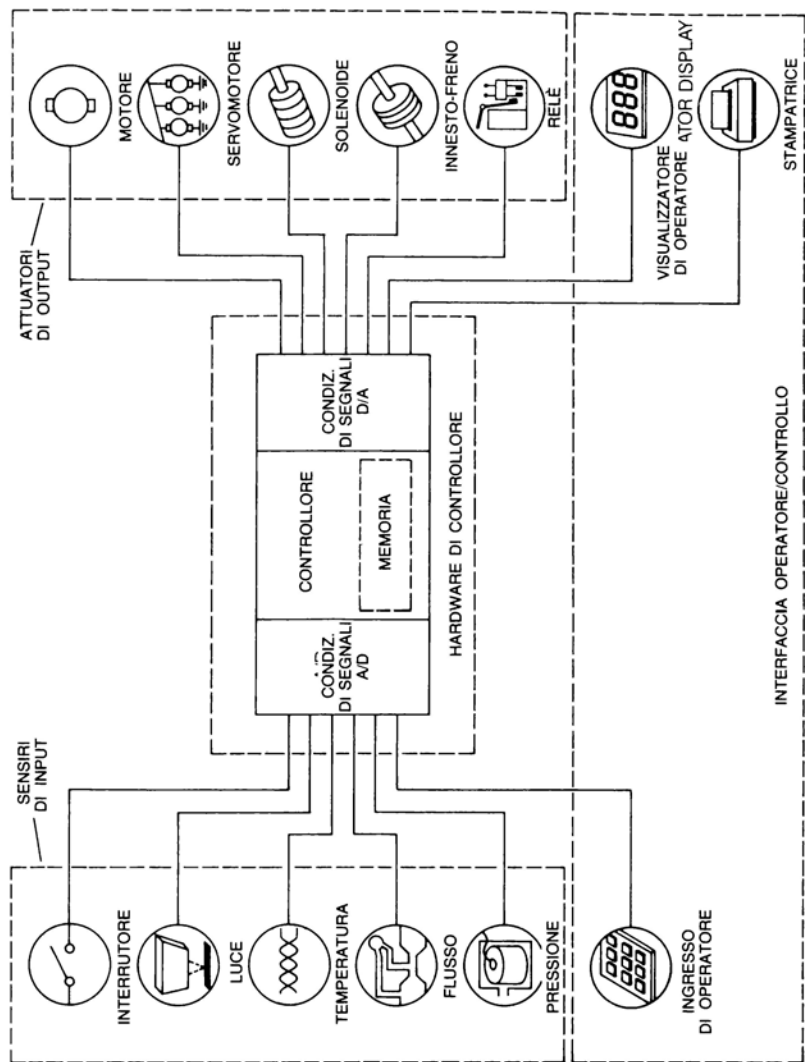



Figura 3-1. Diagramma dell'hardware di controllo

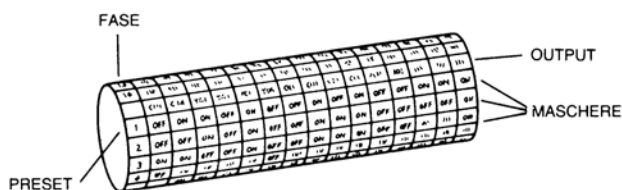
Controllori

Come esposto nel Capitolo 2, un controllore riceve informazioni sul processo, prende una decisione in base a queste informazioni, effettua alcune azioni sul processo e ne verifica i risultati. Questo concetto fondamentale non è cambiato al variare delle tecnologie impiegate, ma col passare degli anni sono state sviluppate varie tecnologie per effettuare le funzioni del controllore. Circuiti logici a relè e controlli pneumatici sono due tecnologie tuttora ampiamente utilizzate. I circuiti logici a relè trovano applicazioni nell'automazione di macchine di tipo sequenziale, mentre i sistemi penumatici solitamente sono impiegati nell'automazione di controlli proporzionali di processi continui.
Sia i processi sequenziali sia quelli proporzionali possono essere controllati mediante un prodotto relativamente recente: il controllore elettronico programmabile impiegante processori a stato solido. La disponibilità di processori e componenti elettronici a stato solido affidabili e a basso costo ha conferito un ruolo primario al controllore programmabile di tipo elettronico. I controllori elettronici programmabili sono «programmabili a software», cioè le istruzioni vengono immagazzinate in una memoria e possono essere facilmente e rapidamente cambiante. Per cambiare le istruzioni in un controllore a relè o di tipo pneumatico sono invece necessari dei nuovi cablaggi elettrici o dei cambiamenti di tubazioni; sovente ciò è difficile, costoso e richiede un tempo considerevole, sempre che sia possibile.

TIPI DI CONTROLLORI

Esistono due tipi di controllori per effettuare i controlli industriali. Il tipo fondamentale è il controllore sequenziale, che effettua un controllo di processo per mezzo di segnali ON/OFF (ovvero di inserimento/disinserimento) che vengono emessi singolarmente o in cicli ripetuti, o in una combinazione di queste due possibilità, per svolgere un determinato compito. Il secondo tipo di unità riguarda il controllo di un processo variabile con continuità, del tipo che si incontra nelle fabbricazioni di prodotti chimici.

Controllore sequenziale

I controllori sequenziali generalmente vengono impiegati per la fabbricazione di prodotti singoli o nella messa in sequenza di un determinato numero di eventi in uno stabilimento. Questi controllori essenzialmente effettuano funzioni di controllo ON/OFF in relazione al tempo, e solitamente sono del tipo ad anello aperto. Il controllo di ciclo con temporizzatore a tamburo è un esempio di controllore sequenziale di tipo elettromeccanico che ha trovato impiego nei numerosi anni nel controllo di apparecchi elettrodomestici, come le lavatrici automatiche. Un motore temporizzatore fa ruotare una o più camme per provocare l'apertura e/o la chiusura di differenti commutatori che a loro volta controllano il funzionamento della macchina. La velocità del motore temporizzatore e il profilo delle camme determinano la durata di tempo di ciascuna operazione, la relazione reciproca delle camme determina la sequenza.

a. Modello di cilindro

TAMBURO DI IMPOSTAZ. = 02 S./CONT = 32000		C 02	C 14	Y 01	Y 03	Y 04	Y 05	C 01	C 03	C 04	C 15	C 05	Y 08	C 12	Y 02	C 13
FASE	CONT.*															
1	00002	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
2	00001	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
3	02000	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
4	00000	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
5	00202	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
6	10000	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
7	00003	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	00010	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
9	00001	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
10	02000	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
11	01230	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
12	00300	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
13	00001	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
14	00001	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
15	00002	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
16	00002	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0

Il contatore di step (Passo) indica per quanto tempo le uscite rimangono nello stato prescritto per ogni passo.
1 – Indica che l'uscita sarà nello stato ON durante il passo.
0 – Indica che l'uscita sarà OFF.

b. Tabella dati

Figure 3-2. Temporizzatore a tamburo

Il temporizzatore a tamburo può essere visualizzato sotto forma di un cilindro avente una matrice di punti di decisione, come illustrato in *Figura 3-2a*. La *Figura 3-2b* rappresenta una tabella con i dati usati in una applicazione di un temporizzatore a tamburo. La colonna di sinistra fornisce il numero della fase e il relativo intervallo di tempo, mentre le colonne restanti rappresentano i singoli punti d'uscita. I numeri «1» o «0» indicano rispettivamente se l'energia è applicata, o meno, ad un elemento d'uscita durante ciascuna fase incrementale. Lo stato di uscita riferito alla fase incrementale diventa il «programma» del temporizzatore a tamburo.
Invece di usare un temporizzatore a tamburo meccanico con camme e commutatori, per effettuare le stesse operazioni in modo molto più semplice si può usare un controllore elettronico programmabile, che consente anche l'aggiunta di numerosi altri controlli che il semplice temporizzatore a tamburo non è in grado di fornire. Per esempio, per ciascuna operazione la sequenza delle fasi e il tempo di ciascuna fase possono essere singolarmente programmate e riprogrammate senza alcuna variazione di cablaggio o di camme. Questa caratteristica verrà ulteriormente analizzata nei successivi capitoli, via via che saranno descritte alcune applicazioni. Per ora ci si concentrerà maggiormente sul sistema di controllo.

Controllore di processo

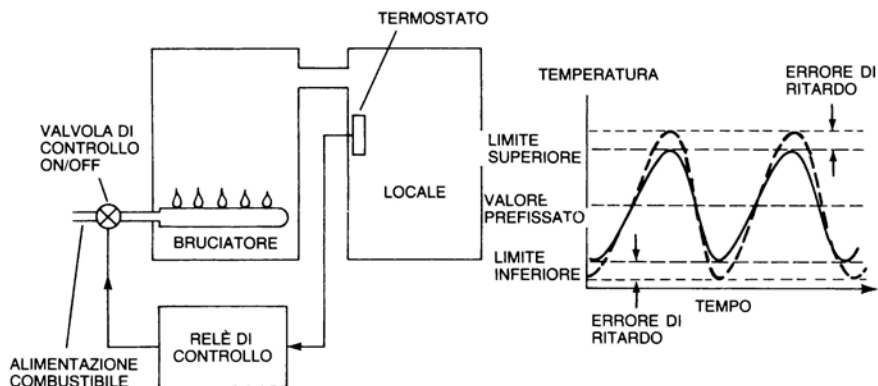
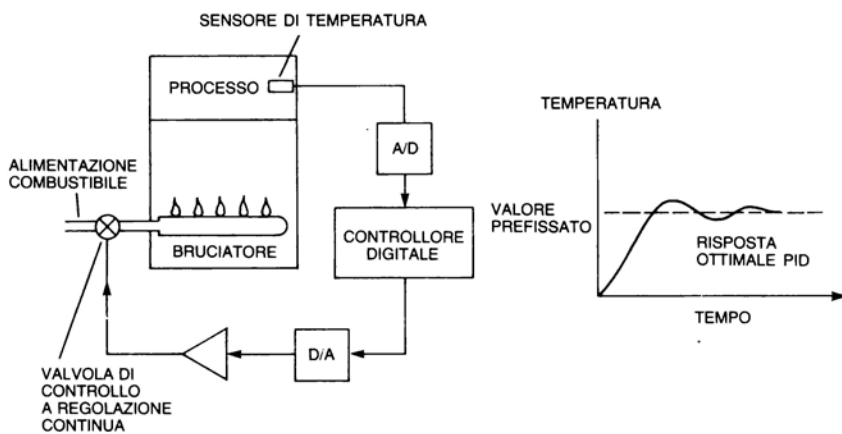
Un controllore di processo può essere usato per il controllo di un processo variabile con continuità che richiede una costante verifica e un continuo aggiornamento degli input e degli output per mantenere con precisione un valore prefissato di regolazione. In luogo di singoli livelli ON/OFF, il controllore di processo fornisce un'uscita che varia con continuità dal tutto inserito al tutto spento. In numerose applicazioni il controllore di processo per espletare la sua funzione deve essere in grado di effettuare anche delle operazioni matematiche.
Per comprendere il funzionamento di un controllore di processo, si consideri il seguente esempio in cui entrambe le soluzioni hanno l'effetto di controllare un determinato parametro, ma il metodo e l'entità di controllo risultano molto differenti.
La prima soluzione, rappresentata in *Figura 3-3a*, fornisce dei mezzi per controllare la temperatura usando un controllo a ciclo limite. Questo è il metodo normalmente impiegato nei sistemi di riscaldamento per abitazioni. L'operatore imposta la temperatura nominale desiderata: questo è il valore prefissato. Il termostato decide se accendere o spegnere il bruciatore in funzione del fatto che la temperatura sia inferiore o superiore al valore prefissato. Per evitare accensioni o spegnimenti del bruciatore ogni pochi secondi, di solito viene usata una zona morta di 2-4°C; questo aumenta l'efficienza del sistema. Tuttavia, anche se la zona morta fosse nulla vi sarebbe comunque un ritardo fra l'input del sensore e l'azionamento del bruciatore, e ciò darebbe luogo ad un certo superamento o abbassamento rispetto alla temperatura desiderata. Usando la tecnica del ciclo limite, la temperatura oscillerà fra un limite superiore e un limite inferiore, come mostrato in *Figura 3-3a*.
La seconda soluzione fa uso di un controllo di tipo proporzionale. Come mostrato in *Figura 3-3b*, in questo caso viene impiegato un controllore di processo in grado di fornire un segnale variabile con continuità ad una valvola di controllo del flusso del carburante che può essere regolata per ottenere dal bruciatore una quantità di calore variabile in modo continuo. La risposta del sistema è illustrata in *Figura 3-3b*. In questo

a. Controllo termico a ciclo limite

b. Controllo termico proporzionale

Figura 3-3. Controllo a ciclo limite e proporzionale

caso, la quantità di calore prodotta può essere regolata in modo da controbilanciare esattamente la quantità di calore disperso, e la temperatura può essere mantenuta ad un valore molto vicino a quello prefissato. La risposta mostrata in *Figura 3-3b* è la tipica risposta del sistema a un disturbo o a una variazione del punto di regolazione.

SENSORI

La possibilità di controllare un processo o una macchina dipende anzitutto dalla capacità di rilevare cosa sta succedendo. Questo è stato e continua ad essere uno dei principali ostacoli nell'automazione delle operazioni attualmente effettuate da persone, specialmente per quanto riguarda la visione (occhi).
Il sensore ideale dovrebbe avere piccole dimensioni, essere di lunga durata, presentare un'elevata affidabilità, ed avere una risoluzione ed un'accuratezza infinite. Il suo output non dovrebbe spostarsi per effetto della temperatura o di altri fattori ambientali e, naturalmente, il sensore dovrebbe essere facile da realizzare e di basso costo. Sebbene attualmente siano disponibili numerosi sensori, vi è una continua richiesta di modelli migliori e più accurati, specialmente da quando la disponibilità di affidabili controllori di basso costo rende possibile l'automazione di un numero sempre crescente di operazioni.
I tipi fondamentali di sensori riguardano le proprietà fisiche necessarie per descrivere il mondo che ci circonda. La capacità di misurare con sufficiente accuratezza queste proprietà è un requisito indispensabile per qualsiasi processo di automazione. Esistono numerose varietà di sensori, dai semplici contatti di interruttori a rivelatori molto complessi di particelle atomiche, e ognuno di questi sensori trova applicazione in vari sistemi di automazione.

SENSORI PER CONTROLLO DI PROCESSO

Il controllo di processi continui solitamente riguarda il mantenimento di un certo numero di parametri differenti entro limiti determinati in precedenza. Tre parametri comuni sono la temperatura, la pressione e il flusso.

Sensori di temperatura

La temperatura è un importante parametro per numerose applicazioni di controllo di processo. Talvolta una reazione potrà aver luogo soltanto ad un valore prefissato di temperatura o quando viene fornita una determinata quantità di calore, e spesso l'efficienza di alcuni processi è influenzata dalla temperatura alla quale essi si svolgono. Correntemente sono utilizzati tre tipi di sensori di temperatura: le termocoppie, i termistori e gli RTD (resistori in metallo puro). Un esempio di questi tre tipi di sensori è illustrato in *Figura 3-4*.

Termocoppie

All'inizio del 1800, Thomas Seebeck scoprì che in un circuito consistente di due giunzioni di metalli differenti viene generata una tensione. Quando una delle due giunzioni è tenuta a temperatura costante, il cambiamento di tensione nel circuito diventa funzione

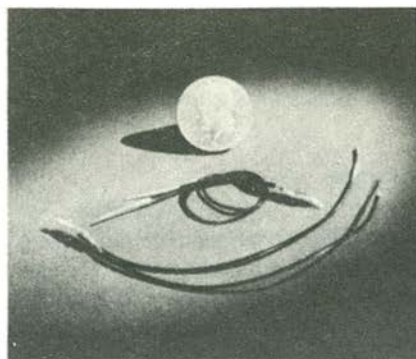
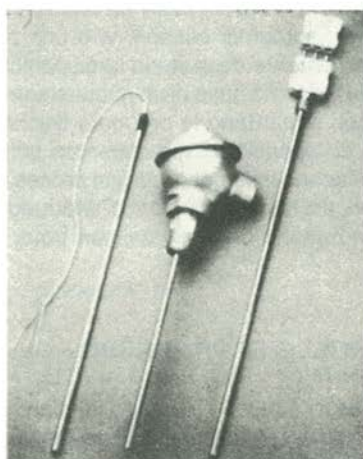
a. Termocoppia
(Per concessione della Beckman Instruments, Inc.)

b. Termistore
(Per concessione della Midwest Components Inc.)

c. RTD
(Per concessione della Omega Engineering, Inc., Stanford, Connecticut)

Figura 3-4. Sensori di temperatura

della temperatura dell'altra giunzione. Questa è la base di un sensore di temperatura a termocoppia. Un'illustrazione di generazione di tensione Seebeck è rappresentata in *Figura 3-5a*.

Le termocoppie richiedono delle misurazioni molto accurate poiché la tensione termica è soltanto di pochi millivolt (mV) per grado centigrado, come mostrato in *Figura 3-5b*. Un tipico circuito di misurazione è rappresentato in *Figura 3-5c*. Malgrado l'elevata accuratezza di misurazione che richiedono, le termocoppie sono probabilmente i sensori di temperatura più ampiamente utilizzati nel loro campo utile, poiché sono intrinsecamente accurati, economici e possono essere facilmente accoppiati ad attrezzature di controllo tramite amplificatori condizionatori di segnali.

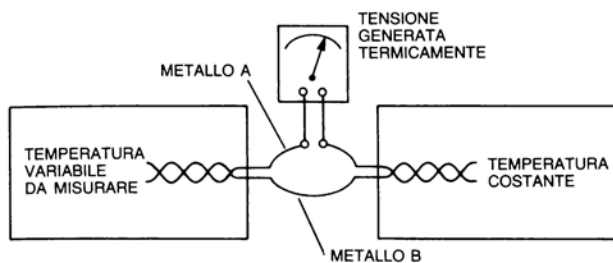
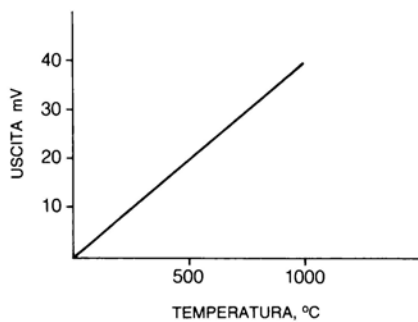
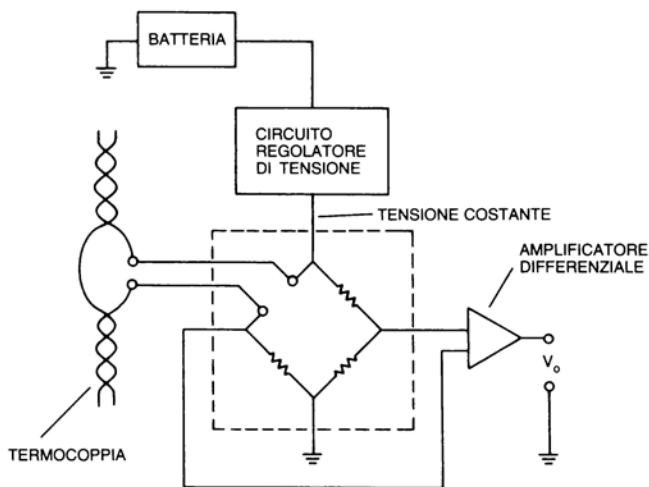
Le termocoppie possono essere utilizzate su un campo di temperatura che si estende

a. Effetto

b. Tensione di uscita in funzione della temperatura

c. Circuito di misurazione

Figura 3-5. Termocoppia

da -250°C a 2000°C, con differenti porzioni di questo campo coperte da diverse combinazioni di metalli. In teoria la temperatura superiore è limitata soltanto dal punto di fusione dei materiali, ma in pratica i problemi di fragilità e di ossidazione solitamente restringono l'uso a temperature molto inferiori a quelle dei punti i fusione.
In *Figura 3-5b* è rappresentata l'uscita elettrica in millivolt di un tipo di termocoppia in funzione della temperatura nel campo da 0°C a 1000°C (1 mV è 0,001 volt). Per questo particolare sensore la tensione di uscita è lineare rispetto alla temperatura e varia di 0,04 mV per ogni grado centigrado di cambiamento in temperatura, con un'uscita di 0,0 millivolt a 0°C. Questa relazione dovrebbe essere memorizzata in una tabella di dati nella memoria del controllore. Dovrebbe inoltre essere scritto un programma per calcolare la temperatura, e anch'esso dovrebbe essere immagazzinato nella memoria. Per esempio, quando il controllore ha ricevuto come input un segnale elettrico di 32 mV, la temperatura dovrebbe essere calcolata mediante un programma che risolve la seguente equazione:

$$\text{Temp } ^\circ\text{C} = \frac{\text{mV entrata}}{0{,}04 \text{ mV}/^\circ\text{C}}$$

$$= \frac{32}{0{,}04}$$

$$= 800^\circ\text{C}$$

Termistori

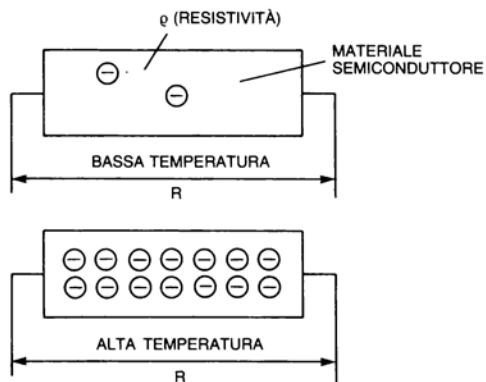
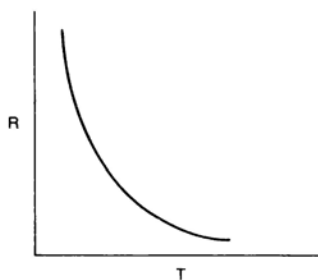
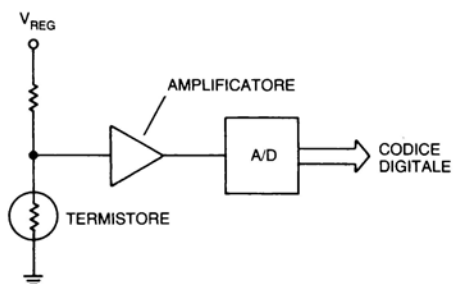
Un termistore è costituito da materiali semiconduttori come ossidi di nichel o di cobalto che presentano una variazione prevedibile e ripetibile di resistenza al variare della temperatura. Quando il materiale viene riscaldato, una maggior quantità di elettroni si libera dal legame covalente, e ciò riduce la resistenza elettrica del materiale, come illustrato in *Figura 3-6a*. Il cambiamento è indicato in *Figura 3-6b* ed è caratteristico di un materiale a coefficiente negativo di temperatura (NTC). In alcuni casi, la resistenza cambia di un valore pari al 5 o 10% per ogni grado centigrado, e per un elemento avente una resistenza di 10.000 ohm ciò equivale ad un cambiamento compreso tra 500 e 1.000 ohm. Per merito di questa sensibilità è possibile effettuare misurazioni di 0,05°C, o di variazioni di temperatura ancora minori, se vengono usati dei circuiti sufficientemente sensibili. Con speciali incapsulamenti privi di saldature, i termistori possono essere usati fino a 1.000°C, tuttavia all'aumentare della temperatura diminuisce la sensibilità relativa, come indicato dall'appiattimento della curva.
Poiché l'output è una variazione esponenziale di resistenza, come illustrato in *Figura 3-6b*, essa deve venire convertita in una variazione di tensione o di corrente per essere usata da un controllore. Un modo semplice per ottenere questo risultato consiste nell'utilizzare il termistore su un ramo di un partitore di tensione, come indicato in *Figura 3-6c*; la caduta di tensione ai capi del termistore varia al variare della sua resistenza. La tensione è quindi alimentata ad un convertitore analogico/digitale che la converte in un codice digitale usabile dal controllore.

a. Effetto

b. Resistenza in funzione della temperatura

c. Circuito di misurazione

Figura 3-6. Termistore

Occorre assicurarsi che la corrente attraverso il termistore non sia elevata al punto da provocare un autoriscaldamento, cioè il termistore non dovrà riscaldarsi per effetto della potenza elettrica in esso dissipata.
I sensori a termistore sono usati quando il campo di temperatura da misurare è limitato e quando non è richiesto un alto grado di precisione. Lo svantaggio dei termistori nei controlli industriali consiste nel fatto che la loro uscita non è lineare al variare della temperatura e pertanto può essere necessario uno speciale condizionamento dei segnali o una speciale elaborazione da parte del processore. D'altro canto i termistori hanno il vantaggio di essere poco costosi e di avere ridotte dimensioni fisiche.

Resistori RTD

Uno dei problemi che si manifestano con un termistore consiste nel fatto che il valore della sua resistenza può variare per effetto dell'invecchiamento, e pertanto il termistore deve essere ritarato per mantenere la necessaria precisione. Un resistore a metallo puro non presenta questo problema. Il suo funzionamento è basato sul fatto che un metallo quando viene riscaldato cambia la propria resistenza elettrica, e l'entità del cambiamento dipende dal suo coefficiente di resistenza in funzione della temperatura.
Un dispositivo RTD è realizzato con un metallo puro avente un coefficiente di temperatura molto prevedibile e ripetibile. I metalli più comunemente impiegati sono il nichel, il rame e il platino; quest'ultimo è il più usato poiché è più facilmente ottenibile in forma pura, è scarsamente ossidabile e ha un coefficiente di temperatura relativamente elevato. Il rame, viceversa, è il meno desiderabile poiché si ossida facilmente, ha un basso punto di fusione e un coefficiente di temperatura molto basso.
Il cambiamento di resistenza dell'RTD viene usato come input per un controllore in modo strettamente analogo a quello del circuito a termistore di *Figura 3-6c*. Tuttavia, l'RDT ha una variazione lineare di resistenza in funzione della temperatura e pertanto la sua uscita può essere accoppiata direttamente a un convertitore analogico/digitale.

Sensori di pressione

In un controllo di processo è molto frequente la necessità di misurare una pressione. Per effettuare questo tipo di misurazione sono disponibili vari dispositivi, ma qui ne verranno analizzati solo tre fra i più comuni. Nessuno di essi fornisce direttamente un segnale elettrico, e pertanto devono essere utilizzati dei sistemi di conversione.

Barometro aneroide

Un barometro aneroide viene costruito realizzando una capsula in materiale rigido, ad eccezione di una parete costituita da una sottile lamina in grado di flettersi facilmente; dalla capsula viene quindi estratta l'aria. La sottile lamina, chiamata diaframma, si flette in funzione della pressione esercitata su di essa. Per utilizzare questo barometro in un sistema di controllo sono necessari alcuni mezzi che consentano di convertire la deflessione del diaframma in un segnale elettrico. Un metodo consiste nel collegare meccanicamente il diaframma al cursore di un potenziometro attraverso cui scorre una corrente, per produrre una caduta di tensione come illustrato in *Figura 3-7*. Quando il diaframma viene flesso da un cambiamento di pressione, il cursore si sposta e la tensione di uscita subisce un cambiamento che dipende dalla pressione.

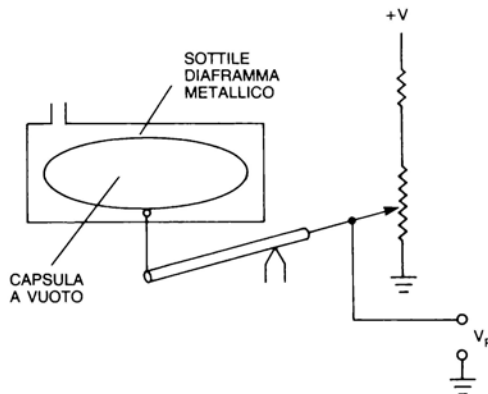



Figura 3-7. Barometro aneroide con potenziometro

Sensore capacitivo di pressione

In *Figura 3-8* è illustrato un altro tipo di sensore che usa una capsula in cui è stato fatto il vuoto, ma questa capsula ha due diaframmi a piastra che agiscono come armature di un condensatore. Le due piastre sono isolate dalla capsula mediante un materiale dielettrico non conduttore, e quando esse si flettono per effetto di variazioni di pressione cambia la capacità del condensatore, perché viene alterata la distanza fra le piastre stesse. Si può misurare la capacità alimentando al sensore capacitivo un segnale in corrente alternata di ampiezza e frequenza note; quando la capacità varia, la tensione di uscita varia in modo proporzionale. Un demodulatore e un rivelatore di fase consentono di ottenere una tensione di uscita proporzionale alla pressione

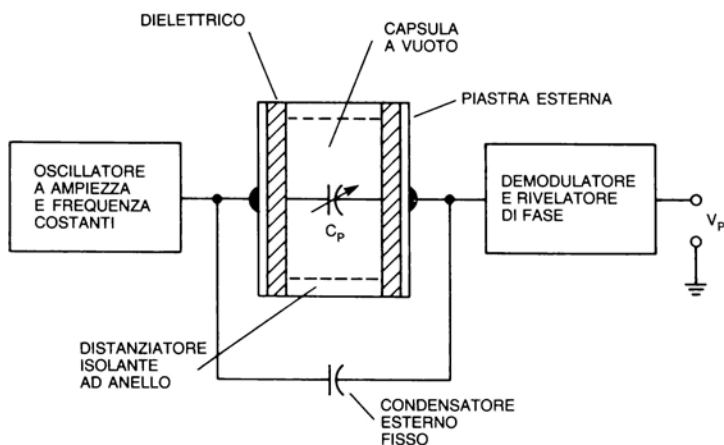



Figura 3-8. Sensore capacitivo di pressione

Sensore di pressione piezoresistivo

Sia il sensore di pressione a barometro aneroide sia quello capacitivo presentano difficoltà di fabbricazione.
Tuttavia esiste un sensore, impiegante una tecnologia a stato solido, che ha minori dimensioni, migliore affidabilità e più basso costo. Anche questo sensore impiega una capsula a vuoto, ma invece di un potenziometro utilizza un piezoresistore, o resistore piezolettrico. Un piezoresistore è costituito da un materiale la cui resistenza varia in funzione della forza di torsione o di flessione agente sul materiale stesso. Il piezoresistore è depositato direttamente sulla lamina flessibile della capsula a vuoto, come illustrato in Figura 3-9a, cosicché il piezoresistore fornisce un'uscita a resistenza variabile senza richiedere alcun meccanismo di accoppiamento. Il circuito per fornire la tensione di input è illustrato in *Figura 3-9b*. L'amplificazione della caduta di tensione ai capi del piezoresistore può essere ottenuta con un amplificatore a circuito integrato, che può essere montato assieme al piezoresistore in modo da realizzare una singola unità.

Sensori di flusso

Numerosi processi richiedono la conoscenza della velocità e della massa di un flusso di materiale, solitamente liquido o gassoso. Per le misurazioni di flusso vengono usati due metodi: uno è basato sul principio di Bernoulli e l'altro impiega una turbina

Tubo di Venturi

Un metodo per misurare un flusso di materiale consiste nell'impiegare un tubo di Venturi, ovvero un tubo che ha un restringimento e funziona in base al principio di Bernoulli. Questo principio stabilisce che, in ogni punto di un sistema chiuso, se aumenta la velocità di un fluido la sua pressione diminuisce corrispondentemente. Poiché la quantità di materiale che in ogni momento fluisce attraverso qualsiasi sezione del tubo è costante, in corrispondenza al restringimento la velocità deve essere maggiore (per consentire il passaggio della stessa quantità di materiale) e in base al principio di Bernoulli la pressione nel restringimento deve essere più bassa. Pertanto, la differenza fra la pressione in corrispondenza al restringimento e quella a monte di esso aumenta al crescere della velocità del materiale. Poiché le dimensioni del tubo e del restringimento sono note, si può determinare l'effettivo flusso di massa del materiale. Ponendo dei sensori di pressione in corrispondenza al restringimento e a monte di esso, come illustrato in *Figura 3-10* il controllore può calcolare il valore del flusso e la massa del materiale trasportato.

Turbina

Un altro metodo per fornire indicazioni di flusso fa uso di una turbina. In questo caso viene posta una girante in un tubo attraverso il quale fluisce il materiale, e l'albero della girante aziona un generatore che fornisce una tensione di uscita proporzionale alla velocità di rotazione.

VISTA DALL'ALTO

SEZIONE A-A

a. Struttura

b. Circuito

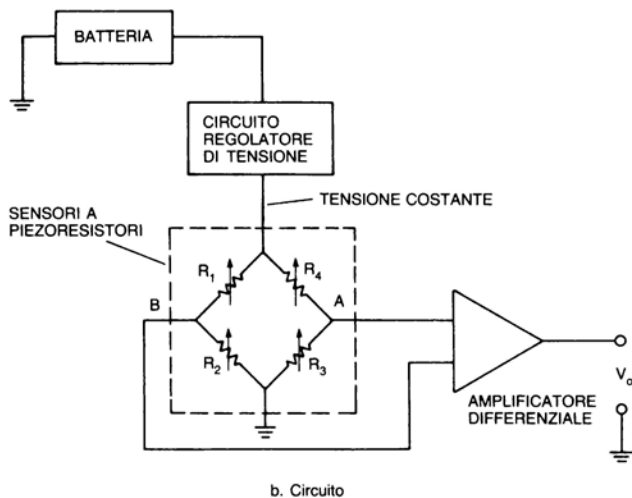
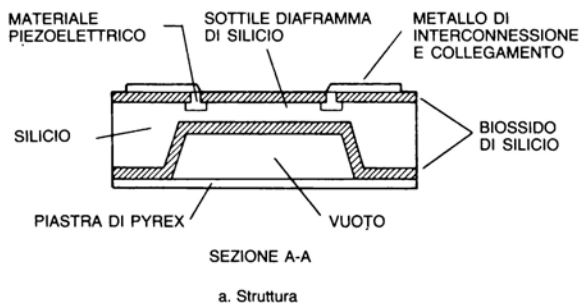
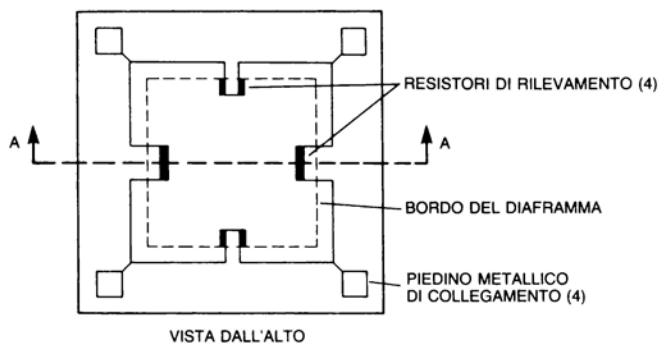



Figura 3-9. Sensore a stato solido a piezoresistori

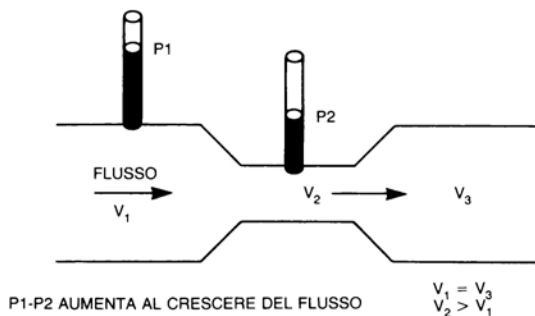



Figura 3-10. Restringimento a tubo di Venturi per misurazioni di flusso

Poiché il rapporto fra la tensione di uscita e la velocità del generatore è noto, conoscendo la sezione trasversale del tubo si può determinare il flusso. Una tipica disposizione è illustrata in *Figura 3-11*.
Un problema comune a tutti i misuratori di flusso è che la precisione dipende da un certo numero di variabili che possono non essere note. Occorre pertanto molta attenzione per assicurarsi che il campo di misurazione e la linearità siano adeguatamente calibrati per la specifica applicazione di interesse.

SENSORI DISCRETI

Talvolta i controllori sequenziali non richiedono input continui dai sensori, ma soltanto delle indicazioni ON/OFF.

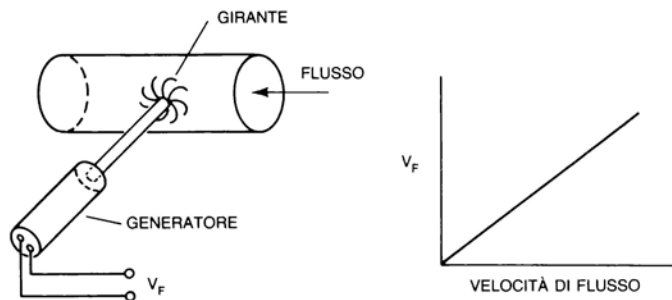



Figura 3-11. Generatore a turbina per misurazioni di flusso

Esempi di ciò con il limite di una pressione o di una temperatura, il valore massimo di un flusso e la posizione di un oggetto. La posizione è uno dei fattori più importanti, poiché spesso la posizione reale di un braccio a leva, di un albero motore o di un'altra parte deve essere nota per effettuare una determinata operazione. Anche nel controllo di processo la posizione di un comando spesso deve essere nota per effettuare la corretta operazione. I sensori di posizione possono essere usati anche per contare oggetti che passano innanzi ad essi, o i giri di un albero.

Sensori di posizione

Uno dei sensori di posizione più semplici, tuttora ampiamente impiegato, è l'interruttore di fine corsa azionato meccanicamente. La chiusura o l'apertura dei suoi contatti può indicare una posizione, ma questo tipo di interruttore per essere azionato richiede un contatto fisico con qualche oggetto. Ciò è soddisfacente per alcune applicazioni, ma per altre un contatto fisico non è desiderabile o neppure permesso. Un sensore di posizione che non richiede contatto fisico è l'interruttore sensibile alla luce.

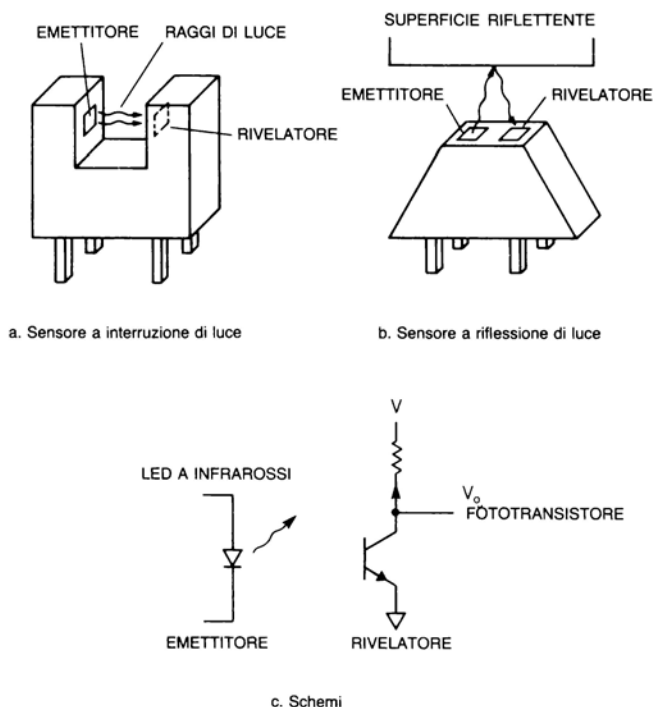



Figura 3-12. Interruttori sensibili alla luce

Interruttore sensibile alla luce

Esistono vari tipi di interruttori sensibili alla luce che usano tecniche fotoelettriche per rilevare una posizione; le *Figure 3-12a* e *3-12b* illustrano due di questi tipi. Uno impiega un raggio di luce che viene interrotto e l'altro usa una riflessione del suo raggio di luce, ma in entrambi i casi il principio di funzionamento è lo stesso: una sorgente di luce visibile o di raggi infrarossi, sovente costituita da un diodo LED, emette una radiazione e un elemento sensibile la rivela, direttamente o indirettamente, per produrre un segnale di uscita. L'elemento sensibile è un fototransistore che diventa conduttivo quando riceve l'energia luminosa. Il risultato è lo stesso che si avrebbe se una corrente atta a produrre una polarizzazione diretta venisse alimentata alla giunzione di base del transistore. In *Figura 3-12c* è illustrato schematicamente un emettitore a LED e un rivelatore a fototransistore. Collegando il collettore del transistore ad una tensione di livello logico tramite un resistore, la tensione al collettore sarà alta in condizioni di buio e bassa in condizioni di illuminazione. Questo segnale può essere accoppiato direttamente a un controllore logico di tipo digitale senza alcun conversione. La *Figura 3-13* indica un'applicazione del sensore ad interruzione di luce per misurare i giri al minuto di un albero.

Interruttore capacitivo

Un metodo per rivelare oggetti metallici consiste nel far sì che essi agiscano come un'armatura di un condensatore.
Un sensore di questo tipo è rappresentato in *Figura 3-14a.* Come illustrato in questa figura, quando non è presente alcun oggetto metallico il segnale di ridotta ampiezza che passa dall'oscillatore al rivelatore è dovuto soltanto alla piccola capacità parassita presente fra le due armature del dispositivo, ma quando un oggetto metallico si avvicina alle armature si formano due condensatori in serie fra loro, come illustrato in *Figura 3-14c.* Il sistema può essere progettato in modo che questa capacità sia di valore

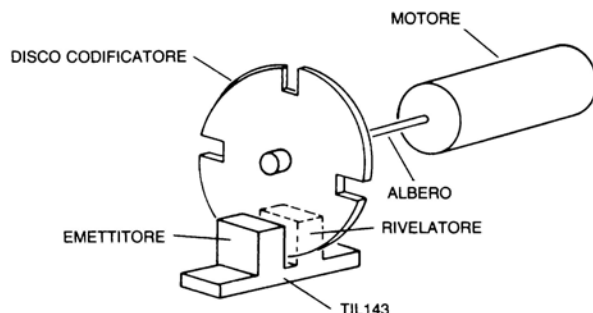



Figura 3-13. Sensore fotoelettrico di posizione

relativamente elevato e lasci passare una parte sostanziale del segnale dell'oscillatore. La sensibilità dipende dalle dimensioni della testina del sensore e dalla distanza che la separa dall'oggetto metallico rilevato.

Interruttore ad effetto Hall

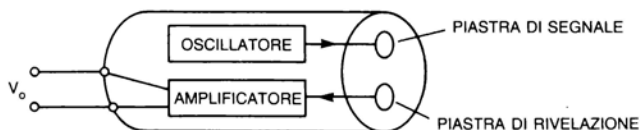
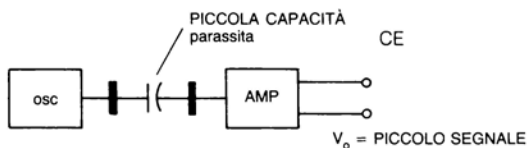
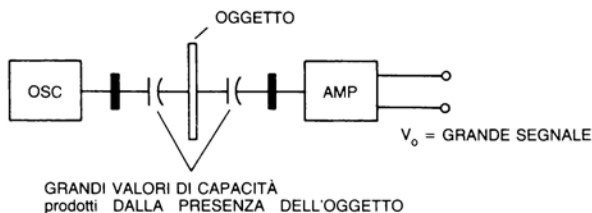
L'effetto Hall, che è noto da oltre cento anni, dipende dalla forza che viene esercitata su un portatore di carica in presenza di un campo magnetico. Questo effetto è illustrato in *Figura 3-15*. Una corrente I di portatori di carica (elettroni) viene fatta passare attraverso una piccola e sottile lastrina di materiale semiconduttore che viene attraversata da un campo magnetico B. Come risultato, agli estremi del materiale semiconduttore si sviluppa una tensione che è perpendicolare sia alla direzione del flusso di corrente che alla direzione del campo magnetico. Avvicinando un magnete ad un interruttore ad

a. Sensore

b. Circuito equivalente in assenza di oggetto

c. Circuito equivalente in presenza di oggetto

Figura 3-14. Sensore capacitivo di oggetti metallici

effetto Hall attraverso cui fluisce una corrente, il dispositivo svilupperà una tensione, che potrà essere utilizzata, per esempio, per rilevare la posizione di un albero rotante, come illustrato in *Figura 3-16*. I dispositivi ad effetto Hall quando sono usati in un ambiente industriale di norma richiedono un'amplificazione del segnale prodotto, specialmente se questo deve essere trasmesso ad uno o più metri di distanza. Sono inoltre necessarie una schermatura e una filtratura.

Sensori di immagine

Nell'automazione industriale i sensori di immagine sono elementi sempre più importanti per sostituire la visione dell'occhio umano. Sono utili non soltanto come rilevatori di posizione, ma anche per effettuare ispezioni ed allineamenti di parti. Un metodo per realizzare una visione artificiale consiste nel digitalizzare l'uscita analogica di una telecamera in modo da poterla usare in un processore digitale. I dati digitalizzati sono immagazzinati in memoria, e sono quindi confrontati in modo digitale con dati di immagini memorizzati in precedenza, per riconoscere una posizione o un oggetto, oppure per compiere azioni basate su una decisione di tipo visivo. I dettagli di questa tecnica, sebbene estremamente interessanti, sono al di fuori dello scopo di questo libro; è tuttavia opportuno tenere presente che l'uso dei sensori di immagine e della elaborazione delle immagini ha un ruolo sempre più importante nei sistemi di controllo.

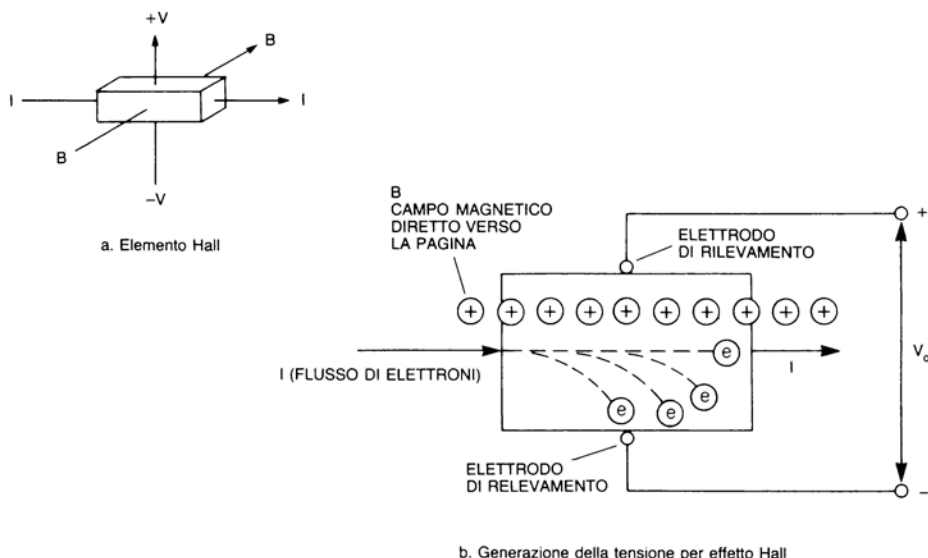



Figura 3-15. Effetto Hall

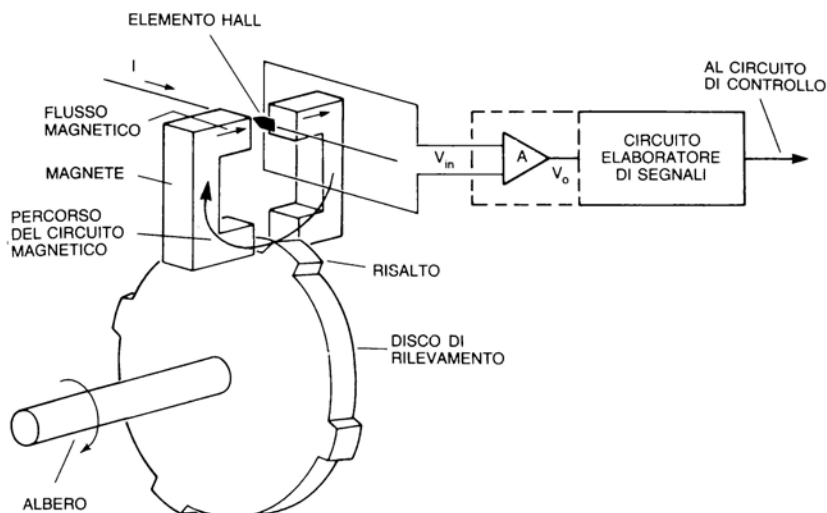



Figura 3-16. Sensore di posizione ad effetto Hall

ATTUATORI

Sia il controllo di processo sia la fabbricazione di parti separate richiedono un movimento meccanico per effettuare una funzione di controllo, e gli attuatori sono i dispositivi che effettuano la conversione da un input elettrico ad un'azione meccanica. Nel controllo di processo quest'azione potrebbe essere costituita dalla regolazione di una valvola per controllare la portata e/o la quantità di un prodotto chimico oppure il calore da erogare per un processo. La fabbricazione di parti separate richiede il movimento del pezzo in lavorazione, o della stazione di lavoro, per effettuare le operazioni richieste. Pertanto gli attuatori sono di vitale importanza in qualsiasi sistema di controllo. Come nel caso dei sensori, le ricerche continuano a produrre attuatori sempre migliori e più utili.
Gli attuatori possono effettuare un'azione di tipo continuo o discreto. Quelli a moto continuo solitamente vengono azionati da un motore elettrico; quelli a moto discreto possono essere azionati da speciali motori, come i motori a passi. Un semplice movimento rettilineo discreto può essere effettuato da un solenoide.

Solenoide

Il solenoide è un dispositivo elettromagnetico, utile come attuatore, che produce una forza meccanica rettilinea. Quando l'interruttore S1 in *Figura 3-17a* viene chiuso, la corrente elettrica che fluisce nell'avvolgimento del solenoide produce un forte campo magnetico all'interno e attorno all'avvolgimento stesso. Questo campo magnetico esercita una forza sul nucleo metallico per attirarlo verso il centro del solenoide. Il nucleo

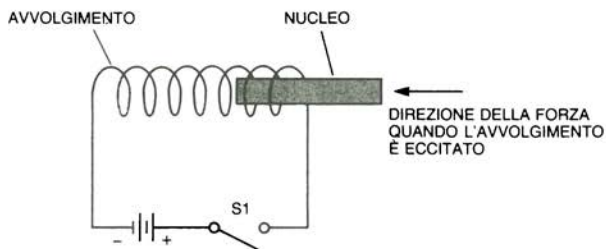
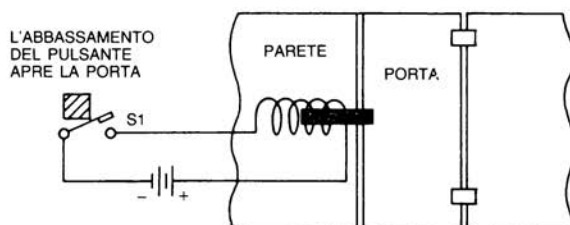



Figura 3-17. Solenoide

solitamente è mantenuto parzialmente lontano dal solenoide mediante una molla (non rappresentata). Un dispositivo da muovere può essere collegato al nucleo direttamente oppure tramite dei leveraggi meccanici per aumentare la forza o la distanza del movimento. In *Figura 3-17b* è rappresentata una semplice applicazione.

Relè

I relè sono usati in numerosi sistemi di controllo come interruttori elettrici azionati indirettamente a distanza o per controllare dispositivi di elevata potenza mediante un segnale a bassa corrente. Il relè usa lo stesso principio della forza elettromagnetica del solenoide, ma il suo nucleo è fisso in posizione. In *Figura 3-18*, la forza magnetica attrae l'armatura verso l'avvolgimento e tramite una leva chiude i contatti elettrici per chiudere il circuito controllato. Quando la bobina viene diseccitata, la sollecitazione elastica dell'elemento che porta la pastiglia di contatto fa riaprire il circuito. Solitamente il relè ha dei contatti normalmente aperti, come rappresentato in *Figura 3-18*, o dei contatti normalmente chiusi, o varie combinazioni di entrambi.

Motori elettrici

Probabilmente il più diffuso tipo di attuatore per sistemi di controllo è il motore elettrico, in quanto la disponibilità di circuiti elettronici di controllo a stato solido di basso costo ha consentito di realizzare numerosi attuatori proporzionali che impiegano motori elettrici. Esistono vari tipi di motori elettrici, ma qui ne verranno discussi soltanto i quattro più comunemente impiegati come attuatori: il servomotore in corrente continua, il motore sincrono in corrente alternata, il motore universale e il motore a passi.

Servomotore in c.c.

Il servomotore in corrente continua utilizza una tensione continua variabile per il controllo di velocità. Un tachimetro azionato dal motore stesso fornisce al sistema di controllo una reazione di velocità, e un sensore rotativo di posizione fornisce una reazione di posizione per costituire un sistema autonomo di posizionamento. Questi motori sono usati quando è necessario un preciso controllo di posizione e un funzionamento ad alta velocità.

La struttura di base del motore in corrente continua è illustrata in *Figura 3-19.* Opera sul principio che su un filo in cui scorre corrente elettrica nasce una forza quando il filo si trova in un campo magnetico statico. Il campo magnetico statico nella figura in questione è prodotto da magneti permanenti. L'avvolgimento del rotore è collegato a segmenti di commutazione, chiamati collettori, e riceve corrente attraverso spazzole che strisciano sui collettori. I collettori e le spazzole formano un commutatore per la corrente del rotore, in modo che essa fluisca sempre nella direzione corretta e fornisca una coppia che determina la rotazione in un senso.

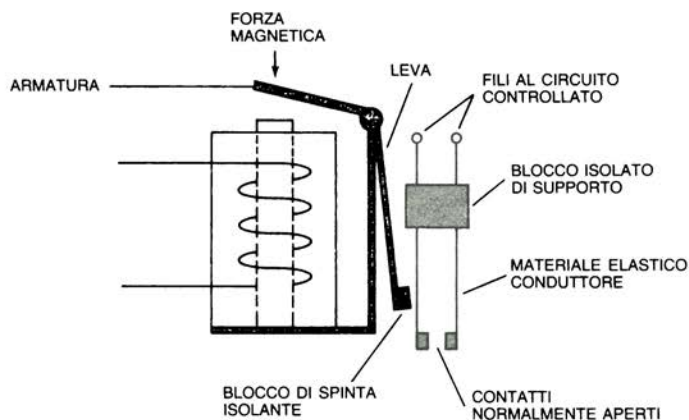



Figura 3-18. Relè semplificato

Il servomotore in corrente continua è in grado di produrre una coppia elevata, ma non dovrà essere sovraccaricato non smagnetizzare i magneti permanenti. Questo tipo di motore richiede un complesso circuito di controllo e pertanto solitamente non viene usato a meno che non siano necessarie le sue particolari caratteristiche.

Motore sincrono in c.a.

In un motore in corrente alternata la corrente fluisce nel rotore sempre nella corretta direzione, e la sua rotazione è determinata da un campo magnetico rotante prodotto da una corrente alternata. Un motore di questo tipo richiede una modesta circuiteria di controllo, ma ha delle possibilità più limitate del servomotore in corrente continua. È utile soprattutto in applicazioni che richiedono una rotazione continua, particolarmente quando è necessaria una velocità costante. La velocità è funzione della frequenza e della tensione di alimentazione, e poiché il motore solitamente è collegato alla rete in corrente alternata, che ha una frequenza stabile, la sua velocità è costante. La *Figura 3-20* illustra la struttura di base di un motore sincrono trifase in corrente alternata.

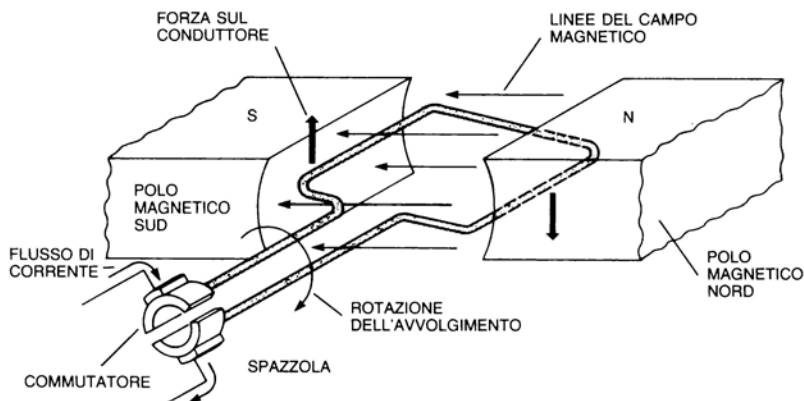



Figura 3-19. Funzionamento di un motore CC a 2 poli

Un motore sincrono trifase viene usato quando è necessaria una coppia elevata, e di solito ha una potenza superiore a 1 CV. Solitamente è più piccolo, più leggero e meno costoso di un motore in c.c. di eguale potenza, e se viene munito di circuiti atti a cambiare la frequenza e la relativa fase può essere usato in applicazioni a controllo di velocità proporzionale. Anche i motori in corrente alternata monofasi e bifasi possono essere usati in numerose applicazioni.

Il motore monofase intrinsecamente non è autoavviante, e solitamente un piccolo avvolgimento di partenza viene alimentato tramite una rete di sfasamento a condensatore per sviluppare la coppia di avviamento; questa coppia, tuttavia, è bassa rispetto a quella di altri tipi di motore. Per variare la direzione di rotazione deve essere invertita

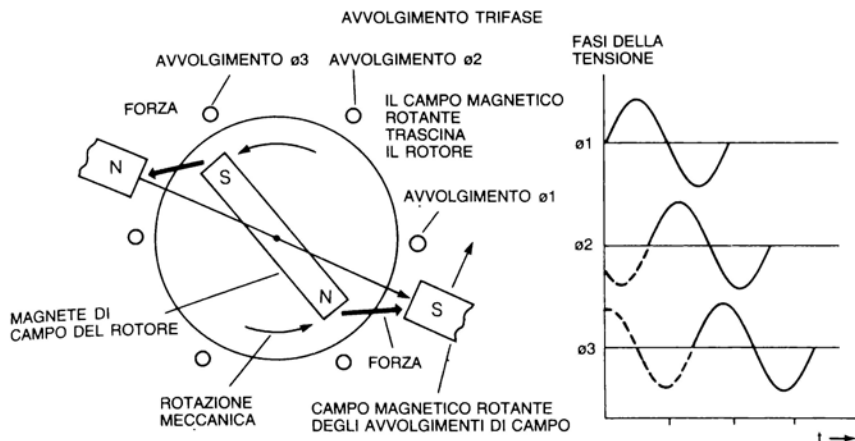



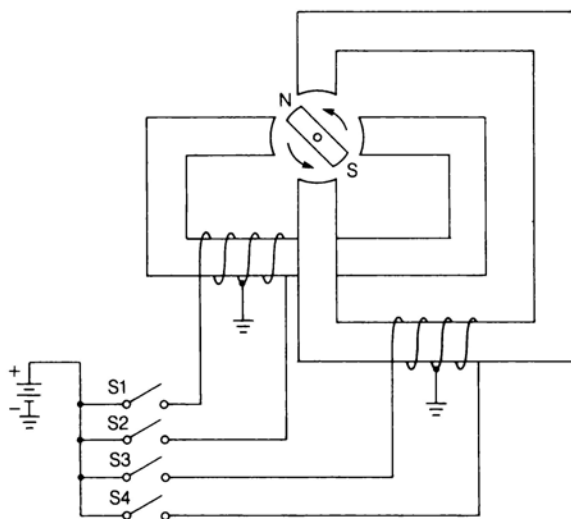
Figura 3-20. Funzionamento di un motore sincrono AC

la fase della tensione dell'avvolgimento di avviamento, e ciò solitamente viene ottenuto utilizzando dei relè o dei commutatori esterni. A causa delle caratteristiche anzidette, questo tipo di motore normalmente è usato in applicazioni in cui non è necessaria un'inversione del senso di rotazione.

Motore universale

Un motore universale deve il suo nome al fatto di poter funzionare sia in corrente alternata che in corrente continua. Questo tipo di motore a rotore commutato con avvolgimenti in serie è molto comune e trova impiego in vari tipi di applicazioni. In un motore con avvolgimenti in serie la corrente del rotore fluisce attraverso gli avvolgimenti di campo in modo da sviluppare un campo magnetico statico; pertanto questo motore non richiede dei magneti permanenti. Ha tuttavia un certo numero di limitazioni, una delle quali è una ridotta possibilità di controllo di velocità, e pertanto viene usato solitamente per applicazioni in cui la velocità non è un parametro critico. Talvolta viene usato con una serie di ingranaggi o con un meccanismo di innesto-freno.

Motori a passi

Un motore a passi è di costruzione simile a quella del motore sincrono in corrente alternata. Tuttavia gli avvolgimenti di campo, invece di essere alimentati da una corrente sinusoidale variabile con continuità come nel caso di un motore sincrono in corrente alternata, sono alimentati con livelli di tensione discreti che vengono "fatti ruotare" a passi in modo incrementale: da ciò deriva il nome del motore. Il risultato è che il rotore, che è costituito da magneti permanenti, viene fatto ruotare a passi da un campo magnetico.

Codice	S1	S3	S2	S4
1	0	0	1	1
2	1	0	0	1
3	1	1	0	0
4	0	1	1	0

1 indica che l'interruttore è chiuso
0 indica che l'interruttore è aperto

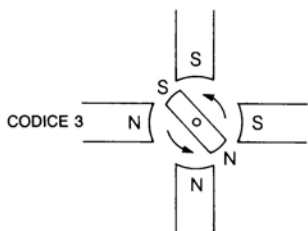
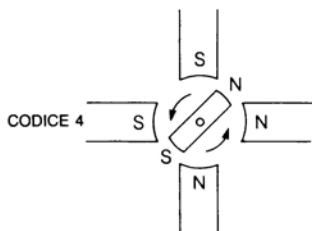
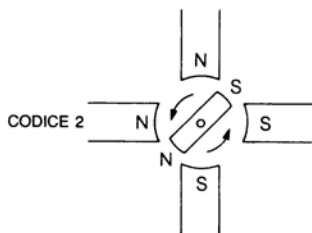
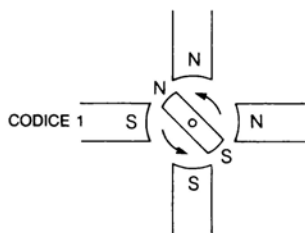



Figura 3-21. Funzionamento del motore a passi

La *Figura 3-21* illustra la struttura di base di un motore a passi in corrente continua e illustra la posizione dei poli magnetici rispetto ai segnali digitali alimentati dalla circuiteria di azionamento. La velocità di rotazione dipende dalla velocità con la quale viene fatto ruotare il campo magnetico. Una limitazione di un motore a passi consiste nel fatto che la coppia disponibile è inversamente proporzionale alla velocità di rotazione. Inoltre, in un motore di questo tipo la velocità deve essere aumentata lentamente da zero al massimo; in caso contrario il motore si bloccherà immediatamente. Occorre anche tenere presente che la maggior parte dei motori di questo tipo ha un punto di risonanza ad una velocità piuttosto bassa, alla quale la coppia è drasticamente ridotta; un motore che sia mantenuto a lungo in questo punto si blocca. Pertanto le applicazioni di un motore a passi devono essere attentamente valutate.
Per azionare questo tipo di motore è richiesta una circuiteria esterna, ma quest'operazione si adatta facilmente ad un controllo digitale diretto. Un altro vantaggio del motore a passi è quello di fornire un preciso controllo di posizione, e questa è una caratteristica importante per le macchine che usano un movimento a passi.
In questi tre primi capitoli sono stati analizzati gli aspetti fondamentali dei sistemi di controllo e nei futuri capitoli si vedrà come questi aspetti vengano applicati ai sistemi di controllo esistenti in pratica.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. Un controllore riceve informazioni su un processo, prende delle decisioni basate su queste informazioni, effettua alcune azioni sul processo e sorveglia i risultati.
2. Esistono due tipi di controllori: sequenziali e di tipo continuo.
3. I controllori sequenziali solitamente hanno segnali ON/OFF e un funzionamento passo a passo. I controllori di tipo continuo regolano un processo che richiede una sorveglianza ed un controllo costanti.
4. I sensori misurano le quantità fisiche di un processo e forniscono un'uscita che può essere resa compatibile con l'ingresso del controllore.
5. Tre parametri variabili con continuità che solitamente devono essere misurati ed immessi all'ingressi di un sistema di controllo sono: temperatura, pressione e flusso.
6. Per misurazioni di temperatura si usano termistori, termocoppie e resistori RTD.
7. Per misurazioni di pressione si usano camere aneroidi, sensori capacitivi e sensori a piezoresistori.
8. Per misurare il flusso si usano tubi di Venturi e turbine.
9. I sensori di posizione usano tecniche fotoelettriche, capacitive, ad effetto Hall e a formazione di immagine.
10. Gli attuatori convertono in azioni fisiche i segnali elettrici in uscita dai controllori.
11. I solenoidi, i relè e i motori elettrici sono i principali attuatori usati nei sistemi di controllo.

Quiz per il Capitolo 3

1. I sensori sono usati per:
a. misurazioni di temperatura.
b. misurazioni di flusso.
c. misurazioni di posizione.
d. misurazioni di pressione.
e. tutto quanto sopra.

2. L'uscita di una termocoppia è:
a. una resistenza.
b. una capacità.
c. una corrente.
d. una tensione.

3. Un termistore:
a. è un dispositivo sensibile alla pressione.
b. ha un'uscita di tensione.
c. misura la temperatura.

4. I sensori di pressione:
a. usano una camera aneroide con un'uscita di resistenza variabile.
b. usano dei piezoresistori.
c. sfruttano variazioni capacitive.
d. tutto quanto sopra.

5. Un interruttore ad effetto Hall solitamente è usato per:
a. misurare la temperatura.
b. misurare la tensione.
c. rilevare una depressione.
d. rilevare la presenza di un oggetto magnetico.

6. Gli azionatori sono usati per:
a. attivare un prodotto chimico.
b. rilevare la presenza di un oggetto.
c. effettuare un movimento meccanico.

7. Un componente primario degli azionatori è:
a. il motore sincrono in c.a.
b. il motore universale.
c. il solenoide.
d. il motore a passi.
e. tutto quanto sopra.

8. Un motore a passi:
a. ha un commutatore.
b.ha una velocità proporzionale alla tensione di entrata.
c. è una buona scelta quando è necessaria una rotazione continua.
d. può effettuare spostamenti di posizione di tipo discreto.

9. Un motore sincrono in c.a.:
  a. può invertire facilmente il suo senso di rotazione.
  b. può ruotare a qualsiasi velocità variando la tensione.
  c. non può bloccarsi.
  d. è utile quando occorre un motore a velocità costante.

10. Un controllore di processo:
  a. è utile in applicazioni continue di controllo di processo.
  b. può interfacciare unità di input e output di tipo digitale e analogico.
  c. può risolvere facilmente un'equazione di controllo di processo di tipo proporzionale-integrale-derivato.
  d. tutto quanto sopra.

11. Un temporizzatore a tamburo è un buon esempio di:
  a. sensore di input.
  b. azionatore di output.
  c. sensore di posizione.
  d. controllore di processo.
  e. controllore sequenziale.

12. I sensori di luce:
  a. non possono essere usati come interrutori limite.
  b. sono montabili in molti modi.
  c. funzionano con la luce solare diretta.
  d. non usano mai sorgenti a raggi infrarossi.
  e. tutto quanto sopra.

13. Un controllore sequenziale:
  a. è un controllore puramente meccanico.
  b. è difficile da programmare.
  c. non è più molto diffuso.
  d. effettua funzioni di controllo ON/OFF in relazione al tempo.

14. Un controllo proporzionale è:
  a. un controllo discreto a due posizioni.
  b. un controllo che varia nel tempo.
  c. un controllo che risponde a passi discreti.
  d. un controllo variabile con continuità.
  e. tutto quanto sopra.

15. Un barometro aneroide:
  a. può misurare soltanto la pressione atmosferica.
  b. è poco affidabile.
  c. sostituisce i termometri a mercurio nel controllo di macchine.
  d. misura la pressione rilevando la deflessione in una camera a vuoto.
  e. nulla di quanto sopra.

16. Un tubo di Venturi:
  a. è costituito unicamente di metallo.
  b. è estremamente difficile da usare.
  c. misura la presenza di un liquido.
  d. può essere usato per misurare flussi di gas o di liquidi.
  e. nulla di quanto sopra.

17. I motori a passi:

a. possono essere realizzati in modo da ottenere differenti spostamenti cambiando la configurazione dei poli.
b. possono ruotare a velocità variabili.
c. possono ruotare in senso orario e antiorario.
d. non richiedono commutatori.
e. tutto quanto sopra.
f. nulla di quanto sopra.

18. Un servomotore in c.c.:

a. usa una tensione variabile in c.c. per controllare la velocità.
b. usa un tachimetro come retroazione di velocità.
c. può fornire un preciso controllo di posizione.
d. tutto quanto sopra.
e. nulla di quanto sopra.

19. Un solenoide:

a. è azionato a molla.
b. può essere usato solo in circuiti in c.c.
c. è largamente impiegato nell'automazione industriale.
d. opera come un aneroide.
e. nulla di quanto sopra.

20. Un relè è:

a. un interruttore elettrico azionato in modo indiretto.
b. ampiamente utilizzato nell'automazione dei controlli industriali.
c. azionato magneticamente.
d. tutto quanto sopra.
e. nulla di quanto sopra.

CAPITOLO 4

FUNZIONI ELETTRONICHE DI BASE

IN QUESTO CAPITOLO

In origine, quasi tutti i sistemi di controllo industriale erano di tipo non elettronico e usavano controllori pneumatici, idraulici o puramente meccanici. Nei successivi sistemi vennero impiegati dei relè per coadiuvare la funzione di controllo, e anche al giorno d'oggi numerosi sistemi sono di questo tipo. I sistemi a relè sono di lunga durata, ma la loro manutenzione e taratura è difficile; inoltre questi sistemi hanno un costo elevato e richiedono molto tempo per apportare cambiamenti nel processo decisionale. Tali cambiamenti, inoltre, non sono sempre possibili.
Il rapido sviluppo dell'elettronica allo stato solido, dal transistore ai circuiti integrati, ha cambiato e continua a cambiare le soluzioni e le tecniche impiegate per i sistemi di controllo automatico. Circuiti logici digitali, microprocessori e microcalcolatori per la presa di decisioni, amplificatori analogici per l'amplificazione e convertitori di tipo analogico/digitale o digitale/analogico per l'adattamento di segnali sono soltanto alcuni degli elementi di base dei sistemi impieganti circuiti integrati. Qui di seguito vengono riportate le fasi del loro sviluppo.

IL TRANSISTORE

La base della moderna elettronica allo stato solido è il transistore. Questo dispositivo a stato solido fu inventato nel 1947 dalla Bell Laboratories e rivoluzionò l'industria elettronica. Il transistore è usato come commutatore in circuiti logici digitali, come elemento di memoria per immagazzinare informazioni e, nei circuiti analogici, come amplificatore e condizionatore di forma dei segnali elettrici. Un transistore è un semiconduttore, poiché è realizzato con materiali come il silicio che si trovano a metà strada fra un buon conduttore di corrente, come il rame, e un buon isolatore, come la gomma. La *Figura 4-1a* rappresenta un transistore al silicio che può essere usato come commutatore. Il silicio può essere di due tipi, tipo n e tipo p; queste due varietà si ottengono aggiungendo al silicio delle impurità che reagiscono in modo elettricamente diverso. Una legge fondamentale dei semiconduttori stabilisce che l'elettricità non può attraversare una giunzione fra un materiale di tipo n e uno di tipo p se il materiale di

a. Un interruttore

b. Cambiamento del materiale di tipo p in materiale di tipo n

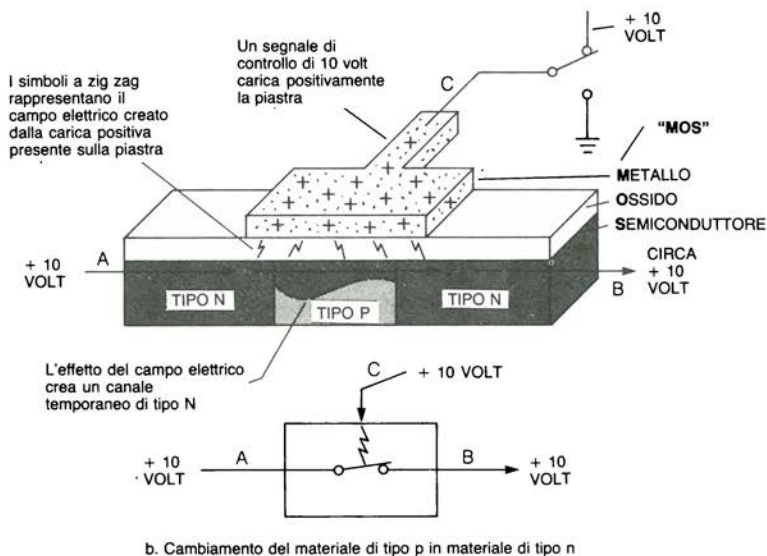
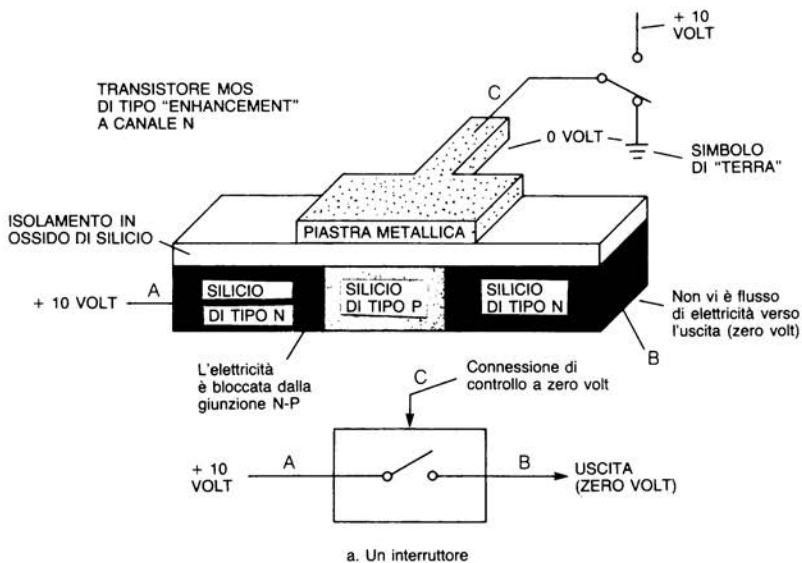



Figura 4-1. Un modello di transistore

tipo n ha applicata una tensione che è più positiva di quella applicativa al tipo p. In un caso di questo genere si dice che la giunzione è "polarizzata" inversamente.
Pertanto, applicando +10 volt al terminale A, la corrente non fluirà verso il terminale B poiché è bloccata dalla giunzione n-p. In questo caso si dice che il transistore è "OFF" o "interdetto". Tuttavia, se una tensione di +10 volt viene applicata alla piastra metallica C che si trova sopra al silicio separata da quest'ultimo mediante uno strato isolante (di ossido di silicio), una parte del materiale di tipo p di fatto viene convertita in un materiale di tipo n per effetto del campo elettrico prodotto dalla piastra, come mostrato in *Figura 4-1b*; la corrente ora potrà fluire fra il terminale A e il terminale B e, come mostrato in *Figura 4-1b*, il terminale B si porterà alla tensione di circa 10 volt. In questo caso si dice che il transistore è "ON" o "conduttivo". Pertanto si può far agire il transistore come un interruttore controllando la tensione sulla piastra metallica. Questo dispositivo è conosciuto come transistore MOS, poiché è costituito da strati successivi di Metallo, Ossido e Semiconduttore.

IL CIRCUITO INTEGRATO

Il successivo progresso di fondamentale importanza è avvenuto alla Texas Instruments nel 1958, quando è stato sviluppato un nuovo metodo che ha consentito la realizzazione contemporanea di vari transistori, diodi e resistori interconnessi su un'unica lastrina di silicio. Questo nuovo dispositivo è stato chiamato circuito integrato (IC). Frequentemente la lastrina di silicio su cui viene realizzato il circuito integrato viene chiamata "chip", con termine tratto dalla lingua inglese. La tecnologia è avanzata al punto che su un singolo chip quadrato con lato di circa 6 millimetri possono essere realizzati circuiti con più di 100.000 transistori unitamente ad altri dispositivi come resistori e condensatori. In fase di produzione, centinaia di circuiti identici sono realizzati contemporaneamente su una lastrina di silicio avente un diametro compreso all'incirca fra 7 e 15 centimetri. Per svolgere determinate funzioni, questi componenti sono interconnessi fra loro mediante conduttori realizzati evaporando sulla superficie del chip uno strato metallico che viene poi inciso selettivamente. La *Figura 4-2* rappresenta un circuito integrato interconnesso in modo da operare come microprocessore.
Tutti i dispositivi che verranno analizzati in questo capitolo sono disponibili sotto forma di circuiti integrati. Alcuni di essi includono circa 100.000 transistori, ma sono fabbricati mediante una tecnica che consente di ridurre le dimensioni, il consumo di potenza e il costo pur aumentando le prestazioni.

PORTE LOGICHE

Le porte logiche (gate) vengono usate nei sistemi digitali per prendere decisioni sulla base degli eventi che si presentano; questi circuiti non sono in grado di ricordare quali decisioni sono state prese in precedenza. Una porta logica è prevista in modo da avere un determinato output (uscita) soltanto se talune condizioni sono presenti al suo input (ingresso). Gli input e gli output delle porte logiche sono definiti da due livelli: l'1 e lo 0 binari che sono stati considerati in precedenza. Nell'analisi che segue, un 1 binario sarà considerato una condizione "ON" e uno 0 sarà considerato una condizione "OFF". Verranno ora descritte le tre funzioni logiche fondamentali sulle quali sono basati i circuiti logici: le funzioni AND, OR e NOT.

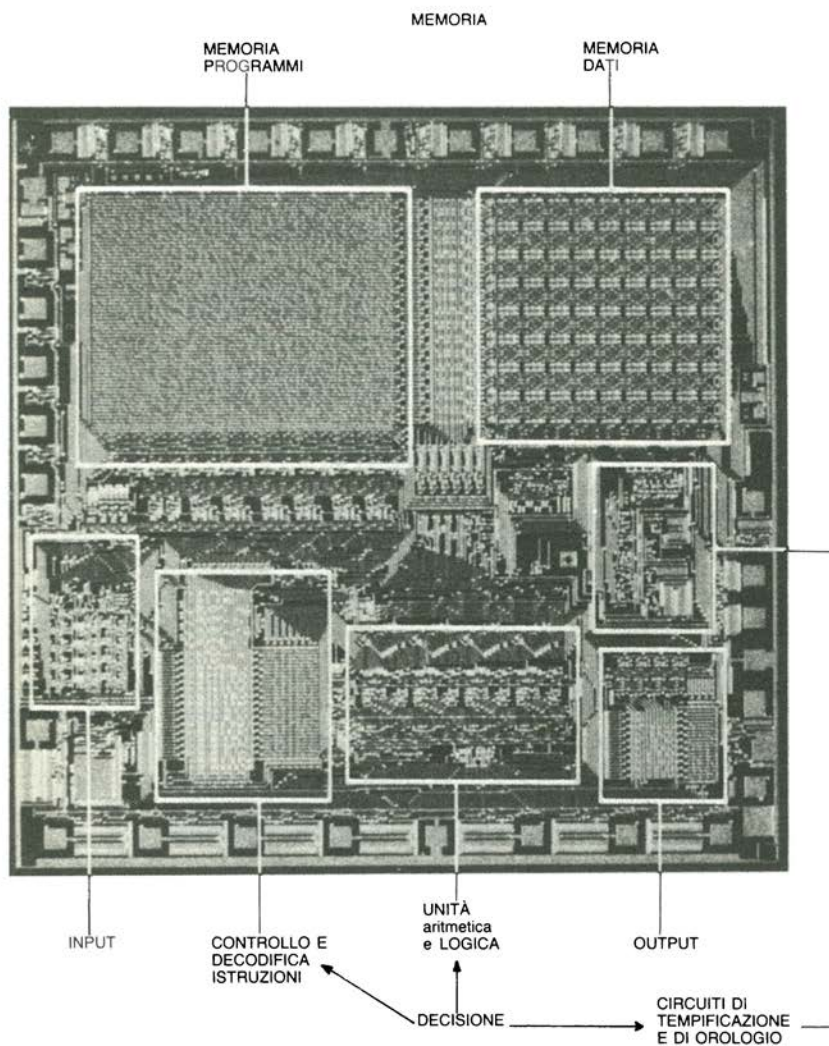
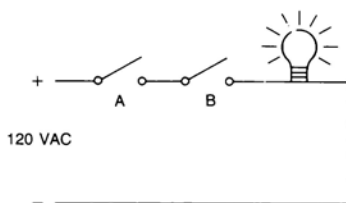



Figura 4-2. Un tipico circuito integrato

La porta AND

La *Figura 4-3A* illustra un circuito nel quale la lampada si accende soltanto se entrambi gli interruttori A e B sono chiusi. Questa è la rappresentazione funzionale della porta AND (chiamata anche porta E). La tabella in *Figura 4-3b* indica se la lampada è accesa o spenta in funzione delle posizioni degli interruttori. Il simbolo della porta AND usato negli schemi logici è rappresentato in *Figura 4-3c.* In tutti gli schemi logici che usano simboli simili a quelli della *Figura 4-3c* si presuppone che il circuito sia collegato fra la sorgente di alimentazione e la massa. La tabella in *Figura 4-3d* è chiamata tavola di verità ed indica l'output per tutte le possibili combinazioni di input; in questo caso, tutti gli input devono essere 1 per avere un output 1. La porta AND può avere più di due input, ma vale sempre la stessa legge:
Se tutti gli input di un circuito AND sono a livello logico 1, anche l'output è al livello logico 1; in tutti gli altri casi l'output è al livello logico 0.
Sovente viene usata una tensione di +5 volt per indicare un 1 binario, e di 0 volt per indicare uno 0 binario; pertanto, l'output sarà +5 volt soltanto se entrambi gli input sono a +5 volt. Nelle tensioni di +5 e 0 volt non vi è nulla di particolare e potrebbero essere scelti anche altri valori. Per esempio, una tensione di +9 volt potrebbe essere un 1 binario e una tensione di +1,88 volt potrebbe essere uno 0 binario. Tuttavia, affinché i circuiti e i sistemi possano cooperare fra loro occorre stabilire in anticipo i particolari valori che verranno usati, e +5 e 0 volt sono i livelli comunemente accettati.

a. Circuito di lampada

c. Simbolo della porta AND

A	B	LAMPADA
APERTO	APERTO	SPENTA
APERTO	CHIUSO	SPENTA
CHIUSO	APERTO	SPENTA
CHIUSO	CHIUSO	ACCESA

b. Stato della lampada

INPUT		OUTPUT
A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

d. Tavola di verità

Figura 4-3. Simbolo e tavola di verità dell'operazione AND

In *Figura 4-4* è rappresentato un uso pratico di una porta AND nel controllo di processo. Il sistema di controllo è progettato in modo che sia presente un 1 in ciascun input quando la condizione è soddisfatta. Se nessuna condizione o se soltanto una o due condizioni sono soddisfatte, la lampada è spenta. Quando tutte e tre le condizioni sono soddisfatte, la lampada è accesa. La lampada, pertanto, indica lo stato in questo punto del processo. Ciò può essere solo per informazione o per indicare all'operatore di procedere alla fase successiva. L'output potrebbe anche essere collegato ad un altro circuito che consente al processo di effettuare automaticamente la fase successiva quando tutte le condizioni di input sono quelle specificate.

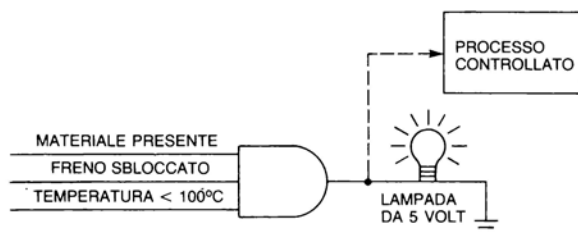



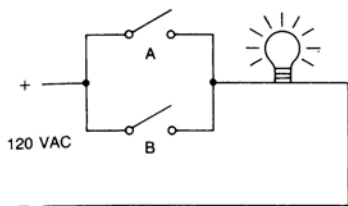
Figura 4-4. Uso di una porta AND in un processo industriale

La porta OR

La legge fondamentale che governa il funzionamento della porta logica OR (o porta O) può essere esposta nel modo seguente:

Se uno o più input di una porta OR sono al livello logico 1, l'output è al livello logico 1; in tutti gli altri casi l'output è al livello logico 0.

La *Figura 4-5a* mostra un circuito che è la rappresentazione funzionale della porta OR. Se è chiuso l'interruttore A o l'interruttore B, o se entrambi sono chiusi, la lampada si accende, come indicato nella tabella di *Figura 4-5b*. Il simbolo logico e la tavola di verità per la porta OR si trovano nelle *Figure 4-5c* e *4-5d*. Anche in questo caso vi possono essere più di due input.

Frequentemente le porte OR sono usate nel controllo di processo per accertare se si verificano condizioni che richiedono un'azione di emergenza. Per esempio, come mostrato nella *Figura 4-5e*, la porta OR può controllare se vi è fumo, una perdita di potenza, una temperatura eccessiva o un intruso in una stanza. Tutti questi segnali sono inviati ad una porta OR; la presenza di uno o più di essi farà sì che la porta produca un'output che fa suonare un allarme.

a. Circuito di lampada

c. Simbolo della porta OR

A	B	LAMPADA
APERTO	APERTO	SPENTA
APERTO	CHIUSO	ACCESA
CHIUSO	APERTO	ACCESA
CHIUSO	CHIUSO	ACCESA

b. Stato della lampada

INPUT		OUTPUT
A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

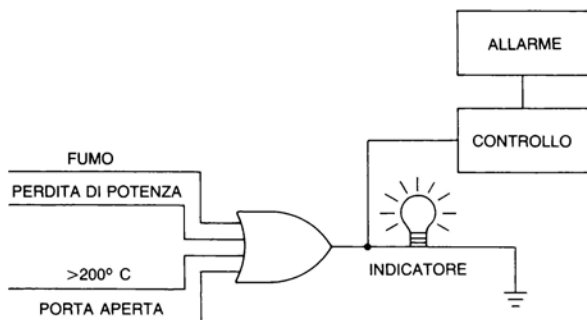
d. Tavola di verità

e. Controllo a porta OR

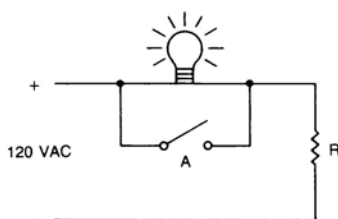
Figura 4-5. Simbolo e Tavola di verità dell'operazione OR

La porta NOT

L'ultima delle tre funzioni logiche fondamentali è la funzione NOT, che è descritta in *Figura 4-6*. La legge per il suo funzionamento è la seguente:

Quando l'input di una porta NOT è al livello logico 1, l'output è al livello logico 0; quando l'input è al livello logico 0, l'output è al livello logico 1.

La porta NOT è anche chiamata "invertitore", poiché l'output è sempre l'opposto dell'input. Questa porta, a differenza delle altre, può avere soltanto un input.

La *Figura 4-6a* rappresenta un circuito elettrico che svolge la funzione NOT. Se l'interruttore A viene aperto, la lampada si accende; se l'interruttore A viene chiuso, la lampada si spegne, come indicato in *Figura 4-6b*. Il resistore R è incluso per prevenire dei corti circuiti della tensione di alimentazione di 220 volt quando l'interruttore A è chiuso. La *Figura 4-6c* è il simbolo elettronico della porta NOT e la *Figura 4-6d* è la relativa tavola di verità.

a. Circuito di lampada

c. Simbolo NOT

A	LAMPADA
APERTO	ACCESA
CHIUSO	SPENTA

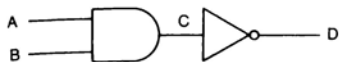
b. Stato della lampada

A	C
0	1
1	0

d. Tavola di verità

Figura 4-6. Simbolo e Tavola di verità dell'operazione NOT

Le porte NAND e NOR

Le tre funzioni logiche fondamentali analizzate in precedenza possono essere combinate per formare due ulteriori funzioni logiche che possono essere svolte da un circuito. La *Figura 4-7* illustra una combinazione di porte AND e NOT per formare una porta NAND. Si confrontino le tavole di verità della *Figura 4-3d* e della *Figura 4-7d* per verificare che in *Figura 4-7d* l'output è stato invertito, come risultato dell'azione della porta NOT sull'output della porta AND.

a. Combinazione delle porte AND e NOT

c. Simbolo della porta NAND

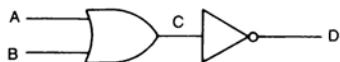
A	B	C	D
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

b. Tavola di verità per a.

A	B	D
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

d. Tavola di verità per c.

Figura 4-7. La porta NAND

La *Figura 4-8* indica che la porta NOR viene formata combinando una porta OR e una porta NOT. Si confrontino le tavole di verità di *Figura 4-5d* e di *Figura 4-8d.*

a. Combinazione delle porte OR e NOT

c. Simbolo della porta NOR

A	B	C	D
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

b. Tavola di verità per a.

A	B	D
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

d. Tavola di verità per c.

Figura 4-8. La porta NOR

Sono state così definite cinque funzioni logiche che sono normalmente disponibili sotto forma di circuiti completi da usare in sistemi logici digitali per prendere delle decisioni. È opportuno rilevare nuovamente che questi circuiti non ricordano quali decisioni essi hanno preso – non hanno, cioè, capacità di memoria. Il loro output in ogni particolare momento è basato soltanto sulle condizioni di input. Un attento studio del funzionamento delle porte e la comprensione del loro modo di operare sarà molto utile, poiché queste porte verranno usate fra breve per realizzare dei moduli elettronici.
I metodi per proteggere sistemi che impiegano porte logiche esulano dallo scopo di questo libro.

MODULI

Collegando opportunamente fra loro le porte logiche su un circuito integrato, si ottiene un modulo elettronico. Questo modulo può essere usato unitamente ai circuiti fondamentali per effettuare taluni compiti in un sistema automatizzato. Verranno ora analizzati tre moduli molto comuni: il selettore/instradatore, il codificatore e il decodificatore.

Il selettore/instradatore

Nelle applicazioni di controllo elettronico sovente è necessario selezionare e far passare soltanto uno dei vari segnali di input disponibili; analogamente, può esservi la necessità di instradare un determinato segnale ad un dato output.
La *Figura 4-9* illustra in forma schematica queste condizioni usando un commutatore manuale a quattro posizioni. Per un controllo elettronico di commutazione sono usati un selettore o un instradatore.

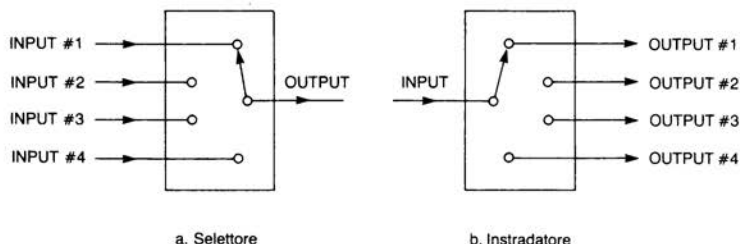
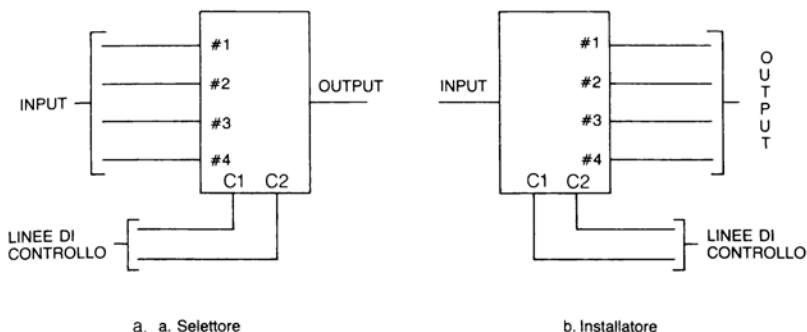



Figura 4-9. Selettore e instradatore meccanici di dati

I simboli del selettore e dell'instradatore elettronico di dati sono rappresentati rispettivamente in *Figura 4-10a* e in *Figura 4-10b*; i segnali codificati di input delle due linee di controllo determinano quale input (o output) deve essere scelto. Il numero delle linee di controllo necessarie dipende dal numero di input (o output). Pertanto, per quattro input (o output) sono necessarie due linee di controllo. La tabella dei codici in *Figura 4-10c* fornisce un possibile metodo di codifica per selezionare una delle quattro linee di input/output (I/O); in base a questa tabella, se C1 = 1 e C2 = 0, è collegata la linea 3 di I/O.

a. a. Selettore

b. Installatore

C1	C2	NUMERO I/O
0	0	1
0	1	2
1	0	3
1	1	4

c. Tabella dei codici per selezione I/O

Figura 4-10. Simboli e tabella dei codici per il selettore e instradatore di dati

Il selettore di dati dell'esempio precedente può essere realizzato usando porte logiche, come illustrato in *Figura 4-11*. Si consideri l'input numero 2. Affinché esso sia collegato all'output, gli altri due input della porta AND identificata da B devono essere al livello logico 1. Uno di questi input è C2, e l'altro è l'inverso di C1 (l'inversione è stata effettuata dalla porta NOT). Pertanto, se C1 = 0 e C2 = 1, i due input che controllano la porta B sono entrambi 1. Allora, se il segnale dell'input #2 è 0, l'output è 0; se il segnale dell'input #2 è 1, l'output è 1. Cioè, l'input #2 è essenzialmente "collegato" all'output, poiché l'output segue l'input #2 (in realtà, il collegamento non è come quello di un commutatore meccanico, ma l'effetto è lo stesso). Si analizzi il circuito per rendersi conto che in ogni momento soltanto un input può essere collegato alla porta OR di output e che l'output sarà allo stesso livello dell'input selezionato.

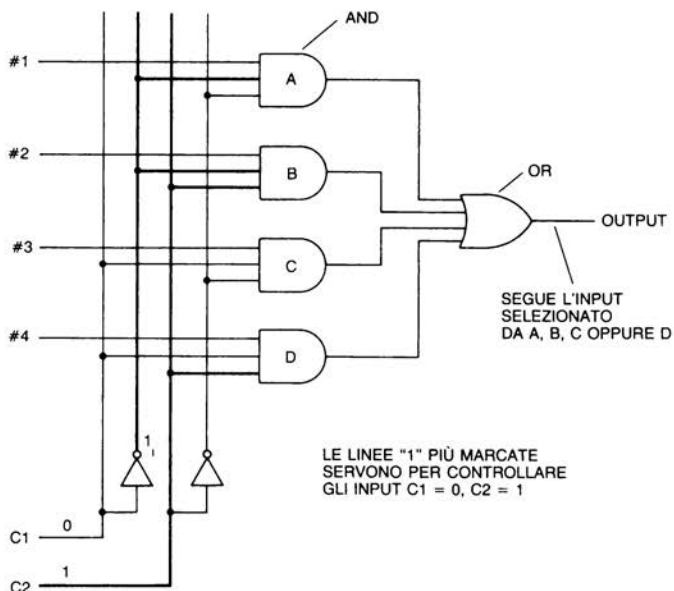



Figura 4-11. Porte logiche fondamentali combinate per realizzare un selettore di dati

Il codificatore/decodificatore

Quasi tutti hanno usato un calcolatore elettronico di tipo tascabile. Quando il tasto del "5" viene abbassato, un "5" appare sul visualizzatore (display) e viene immesso nei circuiti di calcolo. Tuttavia, la parte "elaboratrice" del calcolatore opera soltanto con segnali binari, e non con numeri decimali come il "5". Pertanto il "5" immesso tramite la tastiera deve essere convertito in un segnale binario, chiamato codice binario, che rappresenta il numero decimale: questo viene fatto da un codificatore. Il codificatore deve accorgersi quando un tasto è stato abbassato, identificare di quale tasto si tratta e generare il codice binario che gli compete prima che venga abbassato il successivo tasto. La funzione di un decodificatore è esattamente opposta: ricevere il codice di un numero binario dall'elaboratore e decodificarlo nella forma necessaria per azionare l'unità di visualizzazione al fine di indicare il corrispondente numero decimale. Queste fasi sono indicate nella *Figura 4-12.*

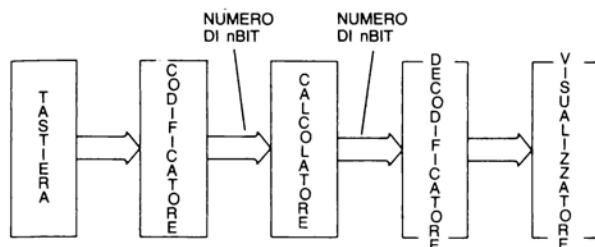



Figura 4-12. Codificatore e decodificatore usati

Il codificatore genera un particolare codice di n bit per ciascun tasto. Per esempio, se n = 3, il codificatore può operare con otto tasti e produrrà un codice di 3 bit per ogni tasto. Il codice assegnato può essere di vari tipi, e uno di questi è indicato in *Tabella 4-1.*

Tabella 4-1. Codice di tastiera

Tasto n°	Output dal codificatore
1	000
2	001
3	010
4	011
5	100
6	101
7	110
8	111

Pertanto, se viene abbassato il tasto numero 4, l'output del codificatore sarà 011; l'elaboratore allora usa il codice 011 per rappresentare il numero decimale 4 nei suoi calcoli.

Analogamente, l'elaboratore invia un codice binario a n bit al decodificatore che converte questo codice in un output compatibile con il visualizzatore utilizzato. Visualizzatori di tipo differente richiedono differenti input, e il decodificatore deve essere scelto in modo che sia adatto al visualizzatore impiegato. Per un input a n bit, il decodificatore deve generare 2^n corrispondenti output.

Nel controllo di processi, la "tastiera" può consistere in una semplice tastiera (keypad) di soli quattro pulsanti o in una tastiera più completa (keyboard) simile a quella di una macchina per scrivere. Le unità di visualizzazione possono essere lampadine, display a matrice di punti, display a sette segmenti, tubi a raggi catodici, ecc.

CIRCUITI LOGICI SEQUENZIALI: IL FLIP-FLOP

In numerose applicazioni il sistema deve ricordare quali decisioni ha preso in precedenza, in modo che l'output sia funzione di queste precedenti azioni oltre che dei valori indicati dai segnali di input. I dispositivi logici con questa capacità sono chiamati dispositivi "sequenziali" o "memorizzanti". Il circuito logico sequenziale di base è il semplice flip-flop mostrato in *Figura 4-13* unitamente alla sua tavola di verità.

R	S	Q
1	1	INDEFINITO
1	0	0
0	1	1
0	0	INVARIATO

b. Tavola di verità

a. Circuito logico

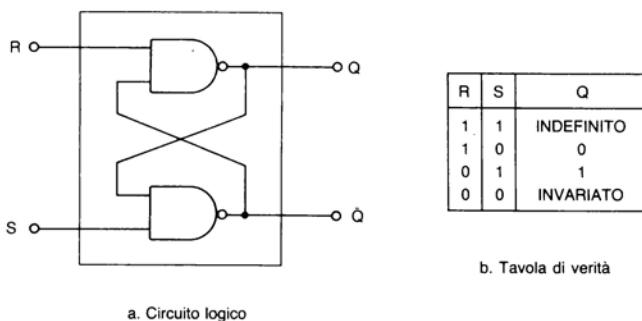



Figura 4-13. Flip-flop fondamentale

Flip-flop R-S

Il flip-flop R-S consiste di due porte NAND interaccoppiate. R e S indicano rispettivamente le funzioni di "Reset" e "Set", che equivalgono a "ripristino" e "impostazione". Se S diventa 1 mentre R è 0, l'output Q è impostato a 1 (o "settato"). Se R diventa 1 mentre S è 0, l'output Q viene ripristinato a 0 (o "resettato"). In entrambi i casi, quando R (o S) torna a 0 dopo essere stato a 1 (con l'altro input che resta a 0), il flip-flop ricorda che R (o S) in precedenza era 1 e l'output Q non cambia. Pertanto l'output Q può cambiare soltanto quando R o S va a 1. L'output $\bar{Q}$ (da leggere "Q not" o "Q negato") è il NOT, ovvero l'inverso, dell'output Q.
Con il flip-flop R-S ci sono due problemi. Se R e S diventano contemporaneamente 1, l'output è incerto. Questo è chiamato stato indefinito o instabile. Inoltre il flip-flop opera in modo asincrono, cioè l'output cambia *ogniqualvolta* R o S diventa 1; questo è un inconveniente se l'output deve cambiare soltanto in tempi predeterminati. Questo cambiamento in tempi determinati, chiamato funzionamento sincrono, si ottiene aggiungendo un input di tempificazione (chiamato anche input di orologio o di clock) C e due altre porte NAND, come illustrato in *Figura 4-14*. Questa figura mostra anche due linee di controllo addizionali chiamate "preset" e "clear" ("preimpostazione" e "azzeramento"). Queste linee consentono di portare separatamente e in qualsiasi momento l'output a 1 o a 0. In figura sono anche riportati il simbolo e la tavola di verità per questo circuito. In funzionamento sincrono, il flip-flop risponde agli input soltanto quando è presente il segnale di orologio. Gli input sono indicati al periodo di tempo n quando arriva il segnale di orologio; gli output sono indicati al periodo di tempo n+1 quando il circuito ha risposto.

SINCRONO		
R	S	Q_{n+1}
0	0	Q_n
0	1	1
1	0	0
1	1	—

ASINCRONO		
PRESET	CLEAR	Q
0	1	0
1	0	1

a. Circuito logico

b. Tavola di verità

c. Simbolo

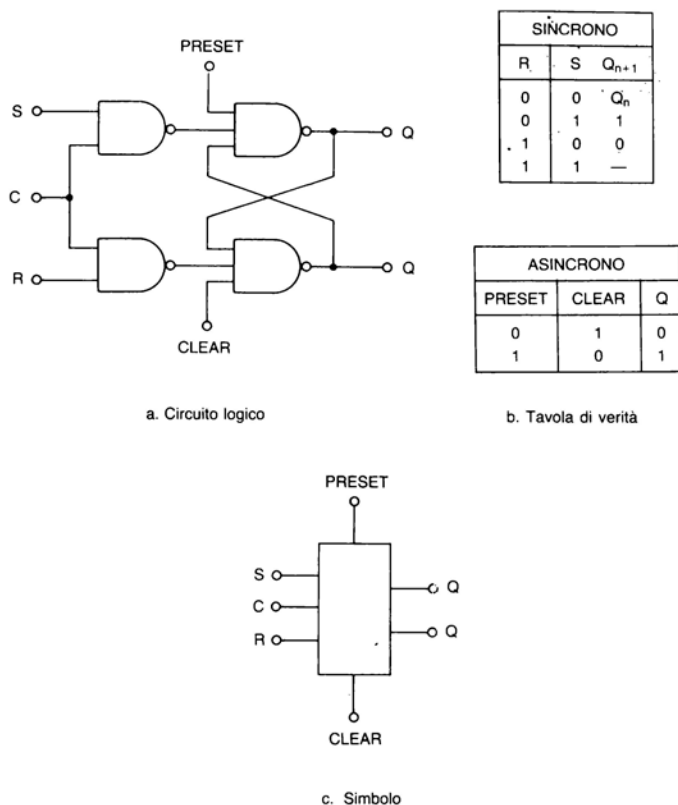
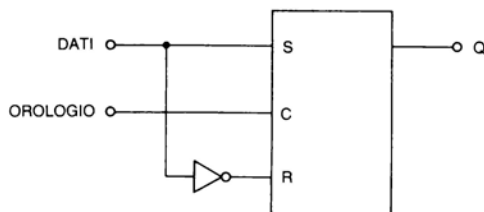



Figura 4-14. Flip-flop sincrono R-S con preset/clear

Flip-flop di tipo D

Se il flip-flop R-S viene modificato come indicato in *Figura 4-15*, si ottiene il flip-flop di tipo D, più comunemente chiamato "latch" o circuito di aggancio. Si noti che l'input di reset viene generato facendo passare l'input di set attraverso una porta NOT. In figura è riportata anche la relativa tavola di verità, e questa indica che l'output Q assume il valore dell'input di set ogniqualvolta viene ricevuto un impulso di orologio. L'input di set può cambiare, ma Q rimane agganciato e non cambierà sino a quando non verrà ricevuto il successivo impulso di orologio.

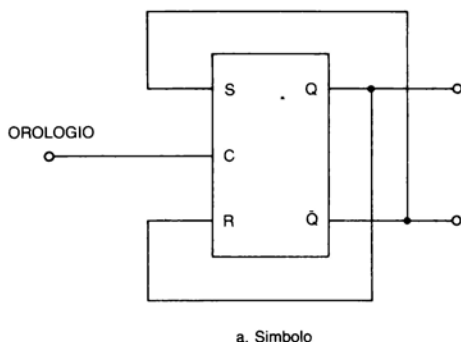
I latch sono usati per catturare informazioni binarie che possono essere presenti soltanto per pochi microsecondi mentre il dispositivo che userà l'informazione richiede che i dati siano disponibili per un periodo di tempo molto più lungo.

a. Simbolo

DATI (AGLI IMPULSI DI OROLOGIO)	Q (DOPO IMPULSI DI OROLOGIO)
0	0
1	1

b. Tavola di verità

Figura 4-15. Flip-flop di tipo D

Flip-flop di tipo T

Il flip-flop in *Figura 4-16* ha la caratteristica di avere come unico input l'impulso di orologio. L'output cambia di valore (stato) al bordo di attacco, o bordo ad andamento positivo, di ciascun impulso di orologio; in altri termini, il flip-flop si "commuta" al ricevimento di ciascun impulso d'orologio.
Si esamini la tavola di verità. C_1 è il valore dell'input d'orologio al tempo t_1 e C_2 è il valore al tempo t_2, con t_2 molto vicino a t_1. Q_1 e Q_2 sono gli input ai tempi t_1 e t_2. L'unico istante in cui Q_2 cambia di valore è quando l'impulso di orologio ha una transizione positiva fra t_1 e t_2.

C_1	C_2	Q_2
0	0	Q_1
0	1	$\bar{Q}_1$
1	0	Q_1
1	1	Q_1

a. Simbolo

b. Tavola di verità

Figura 4-16. Flip-flop di tipo T

La *Figura 4-17* mostra un input di orologio e il risultante output di un flip-flop di tipo T. Si noti che l'output cambia ogni due cambiamenti di input e pertanto la frequenza del segnale di orologio viene di fatto divisa per 2. Se l'output di questo flip-flop fosse collegato all'input di orologio di un altro flip-flop di tipo T, l'uscita del secondo flip-flop avrebbe una frequenza pari a un quarto di quella di orologio. Il flip-flop di tipo T trova impiego nei circuiti divisori e in quelli contatori.

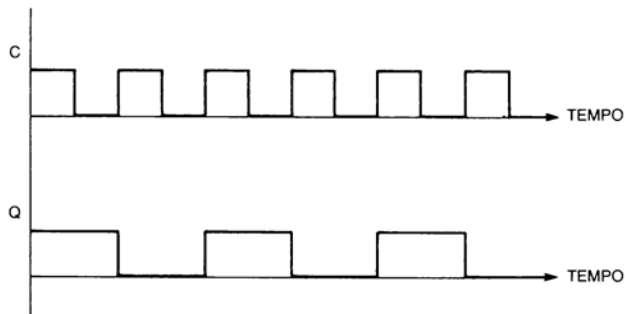



Figura 4-17. Output Q di un flip-flop di tipo T per un input C

Flip-flop J-K

Al fine di superare la condizione di incertezza che si verifica nel flip-flop R-S quando sia R che S sono 1, è stato ideato il flip-flop di tipo J-K. Il simbolo di questo flip-flop e la relativa tavola di verità sono rappresentati in *Figura 4-18*. Quando sia J che K sono 1, l'output cambia di stato; per il resto il funzionamento è esattamente eguale a quello del flip-flop fondamentale R-S.
Sono stati analizzati quattro tipi fondamentali di flip-flop: R-S, D, T e J-K; questi flip-flop, tuttavia, hanno numerose varianti. I tipi fondamentali e alcune delle loro varianti saranno usati nei circuiti che seguono.

J	K	Q_{n+1}	COMMENTO
0	0	Q_n	INVARIATO
0	1	0	RESETTATO
1	0	1	SETTATO
1	1	$\bar{Q}_n$	INVERTITO

a. Simbolo

b. Tavola di verità

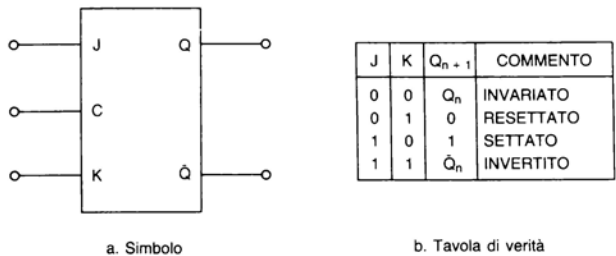



Figura 4-18. Flip-flop di tipo J-K

MODULI SEQUENZIALI

In precedenza è stato analizzato un importante modulo logico sequenziale, il latch; altri moduli fondamentali sono il contatore, il registro parallelo e la memoria.

Il contatore binario

Il contatore binario è una rete di flip-flop che conta impulsi che arrivano all'input e ne immagazzina il conteggio totale nei flip-flop. Gli output generalmente sono previsti in modo tale che si possa determinare il totale immagazzinato. La *Figura 4-19* rappresenta un tipico contatore binario realizzato con quattro flip-flop di tipo T. Sono anche mostrati un treno di impulsi di input e il risultante output binario parallelo. Si noti che quando è stato ricevuto un totale di 16 impulsi (da 0 a 15), il conteggio riparte da 0. Le lettere A, B, E e D rappresentano rispettivamente le posizioni 2^0, 2^1, 2^2 e 2^3 del codice binario. Se A = 1, B = 1, E =0 e D =0, l'equivalente decimale del numero immagazzinato è:

$$0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 2 + 1 = 3$$

Analogamente, se A = 0, B = 1,E = 1 e D = 1, il numero equivalente è:

$$1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 = 14$$

Se viene usato soltanto l'output D, il circuito viene chiamato contatore divisore per 16, poiché il segnale di output ha una frequenza che è 1/16 della frequenza del segnale di input.

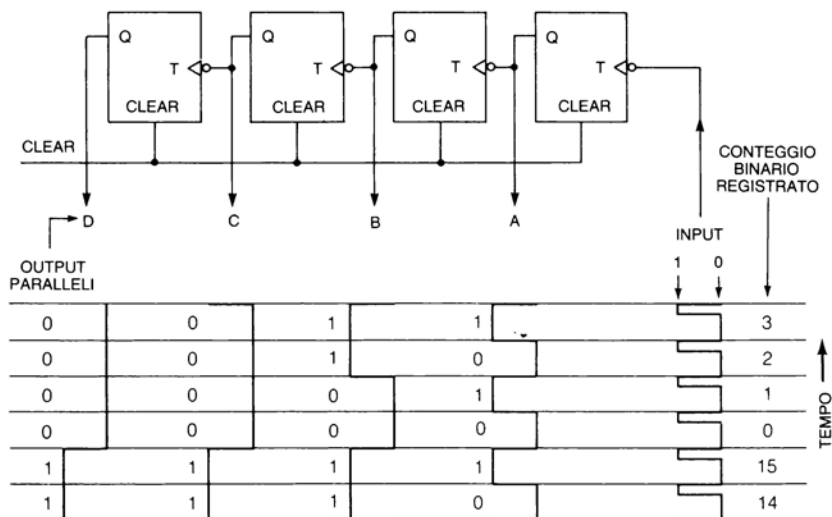



Figura 4-19. Contatore asincrono a 4 bit realizzato con flip-flop di tipo T

Registri paralleli

Come esposto in precedenza, il circuito latch può immagazzinare soltanto un bit, ma spesso è necessario avere dei circuiti in grado di memorizzare due o più bit di una parola binaria costituita da n bit. Ciò può essere fatto con un circuito chiamato registro parallelo o, più semplicemente, registro. Se sono immagazzinati simultaneamente 4 bit di dati, possono essere usati quattro flip-flop di tipo D (latch) che ricevono tutti lo stesso segnale di orologio. Questi flip-flop "cattureranno" i dati presenti a ciascuno dei loro input e li manterranno immagazzinati fino a quando riceveranno il comando di catturare nuovi dati. I dati immagazzinati possono essere "letti" esaminando l'output Q di ciascun latch senza distruggere il dato immagazzinato nel latch stesso. Questo tipo di registro è di fondamentale importanza per il funzionamento dei calcolatori, ed è usato soprattutto nel processore per la memorizzazione temporanea di istruzioni e di dati quando viene eseguita ciascuna istruzione. Per un immagazzinamento più durevole di una grande quantità di dati vengono usati i circuiti di memoria. Se i quattro flip-flop in *Figura 4-19* fossero di tipo D, con un input per ciascun bit, e se la linea di clear (azzeramento) fosse sostituita con una linea di segnali di orologio, l'output parallelo di A, B, E e D rappresenterebbe gli output di un registro parallelo.

Circuiti di memoria

I circuiti elettronici di memoria sono di due tipi fondamentali: le ROM (dalle iniziali di Read-Only Memory) che sono memorie a sola lettura, e le RAM (dalle iniziali di Random Access Memory) che sono memorie ad accesso diretto. La ROM è una memoria di tipo non volatile, poiché il suo contenuto non viene perso se cessa l'erogazione di energia elettrica. Viceversa, la RAM è una memoria volatile, poiché perde le informazioni in essa memorizzate in caso di mancanza di energia.

ROM

Il tipo fondamentale di ROM è una memoria programmabile per mascheramento che viene fabbricata con le informazioni binarie già presenti in essa. A causa degli elevati costi di progettazione delle maschere, la realizzazione del primo dispositivo costa vari milioni di lire, ma le ROM addizionali costano relativamente poco. Questo metodo è pratico soltanto se sono necessarie varie migliaia di ROM eguali (come nel caso di applicazioni ad autoveicoli o a videogiochi).
Un secondo tipo di ROM viene programmato dopo la fabbricazione. Questa ROM programmabile, chiamata PROM, permette dopo la fabbricazione della memoria la sua programmazione con un'attrezzatura poco costosa. Ciò consente la realizzazione economica di differenti tipi di ROM. Se durante la programmazione viene commesso un errore, la PROM deve essere scartata e occorre ripetere la programmazione su una nuova unità.
Poiché gli errori di programmazione sono comuni, è stato sviluppato un altro tipo di memoria cancellabile denominata EPROM (dalle iniziali di Erasable Programmable Read-Only Memory). La EPROM può essere cancellata e riprogrammata rapidamente usando radiazioni ultraviolette; lo svantaggio è che deve essere cancellata l'intera memoria.

La EAROM, che è una ROM alterabile elettronicamente, consente di cambiare soltanto alcune porzioni prescelte di memoria. Poiché la EAROM è relativamente costosa, la EPROM è più diffusa nei comandi utilizzati negli attuali sistemi di automazione.
L'uso più comune di una ROM consiste nell'immagazzinare informazioni che è probabile che vengano usate più volte senza cambiamenti e senza che vi sia la necessità di conservarle nel caso di sospensione dell'alimentazione elettrica. Per esempio, una ROM può essere usata per memorizzare un programma di calcolatore. Per le unità di controllo industriale solitamente vengono usate delle EPROM, poiché il programma di tanto in tanto viene cambiato per controllare un'operazione nuova o per variare una precedente elaborazione. La EPROM può essere cancellata e riprogrammata in modo da includere la variazione.
Come mostrato in *Figura 4-20*, le linee di input di una ROM sono linee di selezione di chip e di indirizzo multiplo. Le linee di selezione di chip consentono di selezionare due o più chip ROM presenti nel sistema. Se la ROM contiene 2^m posizioni di memoria, allora sono necessarie m linee di indirizzamento per identificare le posizioni da leggere. Ogni posizione di memoria immagazzinerà n bit di informazione, e pertanto sono necessarie n linee di dati per leggere simultaneamente tutti i bit di una posizione.

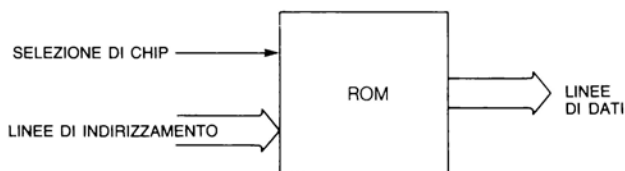



Figura 4-20. Input e output in una ROM

Un tipo di chip ROM molto diffuso può immagazzinare 16.384 bit di informazioni (comunemente detti 16K). Una configurazione può avere 2.048 (2K) posizioni con 8 bit (un byte) immagazzinati in ciascuna posizione. In questo caso sono necessarie 11 linee di indirizzamento (2^{11}=2.048) e 8 linee di dati. Se nel sistema sono usati 4 di tali chip, sono necessarie due linee di selezione di chip per scegliere uno qualsiasi dei quattro chip. I quattro chip forniscono 8.192 parole di memoria (8K byte) di 8 bit.

RAM

Sovente i dati devono essere immagazzinati temporaneamente per essere successivamente recuperati ed usati e, dopo l'uso, devono essere cambiati. I dati potrebbero venire originati da sensori o essere risultati intermedi di calcoli. I dati potrebbero anche essere i risultati di un'analisi da inviare ad un dispositivo di input/output (I/O) come un visualizzatore (display) o una stampatrice. Questi tipi di dati vengono immagazzinati in una RAM, ovvero in una memoria ad accesso diretto.
Una RAM è più complicata di una ROM, poiché deve essere in grado di memorizzare (scrivere) dati che cambiano spesso e rapidamente, e deve inoltre essere in grado di

leggere i dati che sono stati immagazzinati. Tuttavia, in termini di input e output è molto simile alla ROM. Deve essere però aggiunta una linea di input che segnali alla RAM se il dato deve essere scritto o letto. Questa linea è chiamata linea di lettura/scrittura o linea R/W (dalle iniziali di Read/Write). Quando la linea R/W è al livello 1, i dati sulle linee dei dati devono essere immagazzinati (scritti) nella memoria; se è all'altro livello, i dati presenti sulle linee dei dati sono le informazioni che devono essere lette dalla memoria. Ciascuna posizione di bit di memoria è un flip-flop di tipo D, cosicché i dati presenti sulle linee dei dati possono essere agganciati per un'operazione di scrittura. Lo stato della linea R/W determina se gli output o gli imput dei latch hanno accesso alle linee dei dati.

In *Figura 4-21* sono mostrati tre chip RAM collegati a linee a conduttori multipli, chiamate bus di dati. Sebbene tutti e tre i chip abbiano collegamenti fisici al bus di dati, soltanto un chip per volta può essere collegato elettronicamente al bus. Di conseguenza, soltanto un chip per volta può emettere dati sul bus.

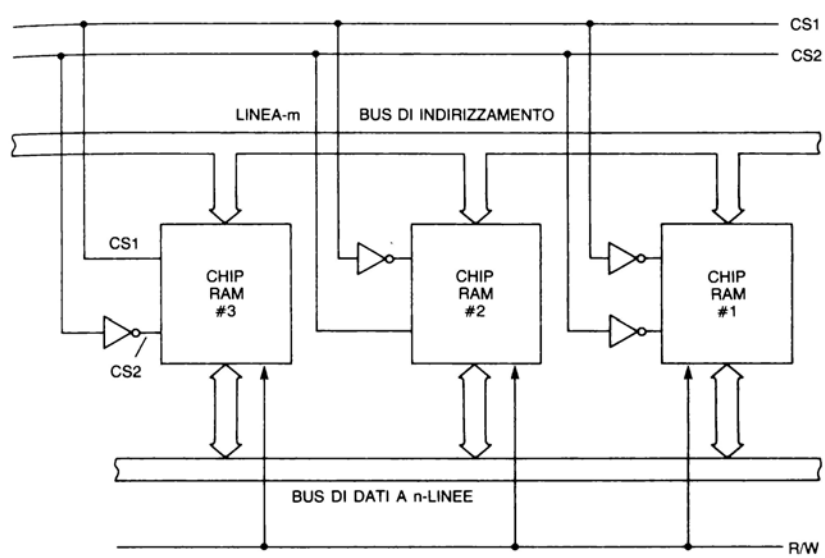



Figura 4-21. Sistema RAM a tre chip

Le linee di selezione di chip controllano quale chip è collegato ai bus. Supponendo che un chip venga selezionato quando gli input CS del chip RAM sono 1, allora per la *Figura 4-2* si verifica la seguente situazione:

Linee selezione di chip #1	#2	Chip di RAM collegato al Bus
0	0	#1
0	1	#2
1	0	#3

Pertanto, per usare una RAM occorre:
1. Selezionare un chip inviando l'oppotuno codice binario sulle linee di selezione di chip.
2. Inviare l'indirizzo della posizione di memoria immettendo il suo codice binario sul bus di indirizzamento.
3. Inviare un segnale ad una linea R/W per indicare l'operazione da effettuare.
4. a. Per un'operazione di scrittura, inviare i dati sul bus dei dati.
   b. Per un'operazione di lettura, leggere i dati dal bus dei dati.

Rassegna di circuiti logici sequenziali

Una logica sequenziale è un circuito il cui output dipende dal precedente valore dell'output nonché dagli attuali input. Il flip-flop è il dispositivo logico sequenziale fondamentale. I quattro tipi fondamentali di flip-flop (R-S, D, T e J-K) possono essere utilizzati per realizzare moduli come i latch (circuiti ad aggancio), i contatori, i registri e le memorie. Questi moduli sono componenti fondamentali dei sistemi di automazione.

CIRCUITI INTEGRATI LINEARI

L'elaborazione dei segnali nei sistemi di automazione non è limitata ai segnali digitali, poiché alcuni sistemi sono interamente analogici e altri usano sia segnali digitali che segnali analogici. I circuiti per elaborare segnali analogici hanno un funzionamento molto differente da quelli per i segnali digitali. La maggior parte di essi opera in modo lineare, cosicché tutte le frequenze dei segnali di ingresso sono presenti nell'output amplificato.
Il circuito lineare di gran lunga più utilizzato è l'amplificatore operazionale, sovente abbreviato in op-amp. Il suo campo di frequenza è compreso fra 0 e circa 1 megahertz. Per frequenze più elevate deve essere usato un amplificatore video, ma nei sistemi di automazione praticamente non è necessario ricorrere a tale dispositivo. Gli amplificatori operazionali hanno un limite anche per la loro potenza di uscita, e se occorre un output superiore a circa 5 watt dovranno essere usati degli amplificatori di potenza. Gli amplificatori di potenza sono realizzati utilizzando transistori discreti, che solitamente sono montati su un dissipatore termico. L'analisi dei circuiti lineari che verrà riportata qui di seguito è limitata agli amplificatori operazionali a circuito integrato.

L'amplificatore operazionale fondamentale

Il simbolo circuitale per un amplificatore operazionale è mostrato in *Figura 4-22a.* Ha due terminali di input: uno inverte il suo segnale all'output (terminale «–») e l'altro non lo inverte (terminale «+»). Il guadagno a circuito aperto dell'amplificatore è all'incirca 100.000, cosicché teoricamente un input di 0,1 volt produrrebbe un output di 10.000 volt. Tuttavia, ciò non è possibile con le tensioni di alimentazione disponibili, e pertanto l'output può raggiungere al massimo 10 volt (in saturazione) ed è sufficiente una piccola tensione di input perché il funzionamento diventi di tipo non lineare. A causa di ciò, la configurazione a circuito aperto non è molto utile per il funzionamento lineare.

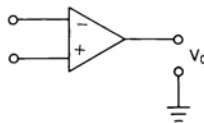
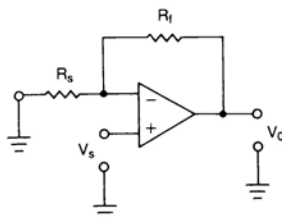
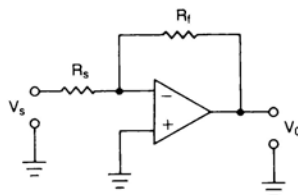



Figura 4-22. L'amplificatore operazionale in tre configurazioni

Le disposizioni più utili usano circuiti ad anello chiuso, come quelli mostrati nelle *Figure 4-22b* e *4-22c.* In (b) il guadagno dell'amplificatore non invertitore (l'output diviso per l'input) è:

$$G_{NI} = \frac{V_0}{V_s} = 1 + \frac{R_f}{R_s}$$

e in (c) il guadagno dell'amplificatore invertitore è:

$$G_I = \frac{V_0}{V_s} = \frac{-R_f}{R_s}$$

La resistenza R_s è presente nel conduttore di input per regolare l'impedenza d'ingresso. Il resistore R_f è chiamato resistore di reazione, poiché forma un piccolo sistema ad anello chiuso in cui parte del segnale di output è retroazionato all'input per controllare il guadagno. Queste disposizioni circuitali sono ampiamente utilizzate come amplificatori per segnali analogici.

Altre configurazioni con amplificatori operazionali

In *Figura 4-23* sono mostrati tre impieghi di amplificatori operazionali in sistemi di automazione. In *Figura 4-23a* è rappresentato un circuito addizionatore, o sommatore; la figura riporta anche la sua equazione. Si noti che l'output è funzione della somma degli input ed è invertito, come indicato dal segno meno dell'equazione. Il sommatore è usato nei convertitori analogici digitali, che saranno analizzati fra breve.

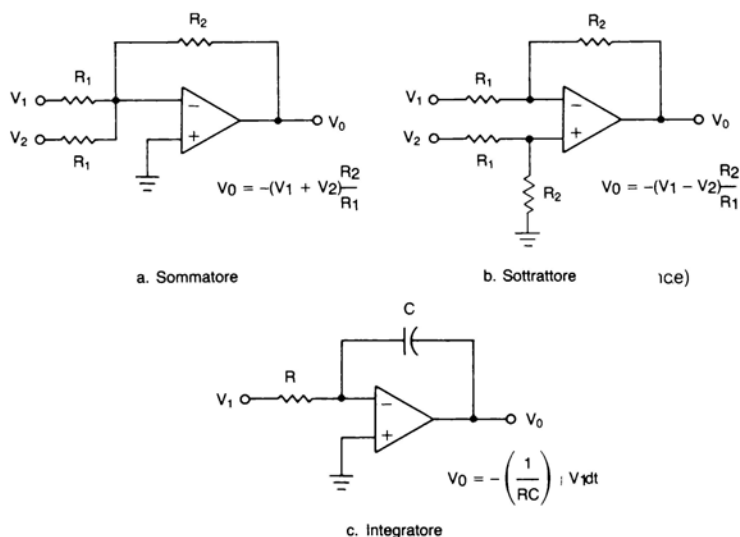



Figura 4-23. Tre tipi di amplificatori operazionali

In *Figura 4-23b* è fornito un circuito sottrattore con la sua equazione. L'output è la differenza fra i segnali di input moltiplicata per il guadagno dell'amplificatore. Il sottrattore è usato quando è richiesta soltanto la differenza fra due segnali (ad esempio, la temperatura desiderata meno la temperatura reale) e non i valori assoluti dei segnali stessi.

Il terzo circuito è un integratore. Come indicato dl simbolo di integrazione presenta nell'equazione in *Figura 4-23c*, un integratore somma continuamente l'input per generare l'output. L'applicazione più utile nei sistemi di automazione è con un input costante, e in questo caso l'output è pari al guadagno moltiplicato per il tempo in cui l'input è stato applicato. Cioè, se viene applicato un input di 2 volt per 0,5 secondi, l'output dell'integratore è 1 volt se il guadagno è uguale a 1. Si noti che il circuito integratore è simile ad un sommatore, ma il resistore di retroazione è sostituito da un condensatore che effettua la funzione di integrazione. Il circuito integratore è un elemento molto importante nei sistemi di controllo di tipo proporzionale-integratore (PI) e proporzionale-integratore-derivatore (PID).

Sintesi

Sono stati analizzati tre tipi generali di moduli usati nei sistemi di automazione: moduli combinatori, moduli sequenziali e moduli analogici. I circuiti più complessi, i sottosistemi e i sistemi usano combinazioni di questi moduli. Molto importante per i sistemi di controllo sono i sottosistemi di conversione di dati per il condizionamento dei segnali e il microcalcolatore.

CONVERSIONE DI DATI

Gli elaboratori digitali richiedono come input dei segnali digitali binari – ovvero segnali che possono avere soltanto due livelli di tensione – e generano come output dei segnali digitali. Sfortunatamente, quasi tutti i sistemi da controllare operano in modo analogico, molti sensori generano segnali di input analogici, e il sistema emette segnali d'output analogici per azionare gli attuatori. Di conseguenza, fra il calcolatore digitale e il sistema controllato devono essere usati dei convertitori da analogico a digitale (A/D) e da digitale ad analogico (D/A). Questo è il condizionamento, o adattamento, dei segnali di cui si è parlato in precedenza. Il concetto di conversione D/A e A/D è realizzato attorno a un principio chiamato teorema di campionatura di Nyquist:
Se un segnale analogico viene campionato uniformemente con una frequenza almeno doppia della massima frequenza in esso contenuta, il segnale originale può essere ricostruito in base ai valori campionati.
Il teorema può essere descritto dall'equazione:

$$f_c \geqslant 2\ LB$$

dove f_c è la frequenza di campionatura e LB è la larghezza di banda del segnale (che è correlata alla frequenza massima).

Campionatura di un segnale analogico.

La *Figura 4-24* mostra come varia nel tempo un segnale analogico. I momenti in cui la forma d'onda viene campionata sono segnati sulla figura e, come rilevabile, l'ampiezza del segnale non varia molto nel breve intervallo di tempo fra campionature contigue. Di conseguenza, la campionatura è una rappresentazione abbastanza fedele del segnale per un breve periodo di tempo su entrambi i lati del punto campionato.

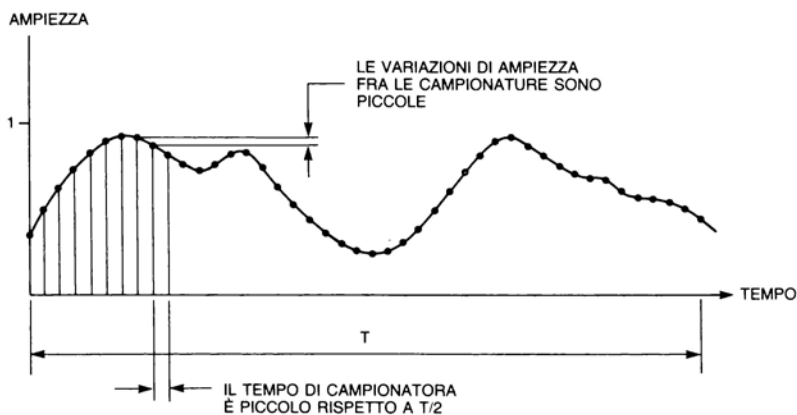



Figura 4-24. Campionatura di un segnale analogico

Ovviamente, un maggior numero di campionature nel tempo T riprodurrebbe più accuratamente la forma d'onda ma, in base al teorema di Nyquist, se il segnale viene campionato con un ritmo che è maggiore del doppio della massima frequenza contenuta nel segnale stesso, i valori campionati conterranno tutte le informazioni presenti nei segnali originali. Se la massima frequenza dei segnali che sono presenti in un sistema di controllo è 100 Hz, la campionatura per una conversione A/D dovrà essere effettuata almeno 200 volte al secondo.

Convertitore analogico/digitale

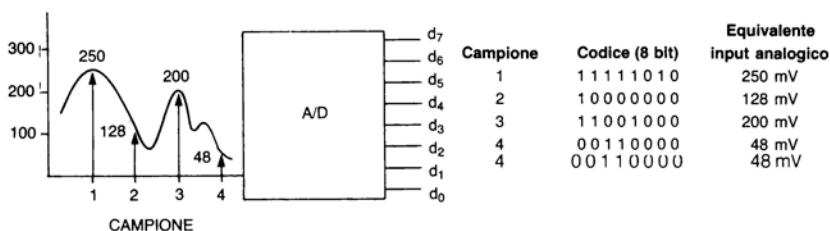
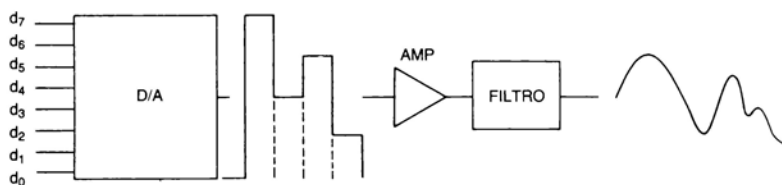
I principi fondamentali di un convertitore A/D sono illustrati in *Figura 4-25a*. L'input è un segnale variabile con continuità che viene campionato in particolari momenti determianti dal ritmo di campionatura, e il valore della tensione campionata è convertito in un codice digitale corrispondente a quel valore. In *Figura 4-25a* è usato un codice a 8 bit. Tutti i bit del codice vengono emessi contemporaneamente dal convertitore (in parallelo) ogniqualvolta l'input viene campionato, e il codice rappresenta il valore del segnale di input al momento della campionatura. I codici sono quindi inviati in parallelo (un conduttore per ogni bit) ad altri circuiti digitali del sistema, o sono inviati sequenzialmente un bit dopo l'altro (in serie) su una singola coppia di conduttori. Dovrebbe essere evidente che se il codice è a n bit e viene campionato al ritmo di s volte per secondo, quando il segnale è inviato seriamente lungo lungo una linea il ritmo in termini di bit per secondo è n x s.

a. Analogico/digitale

b. Digitale/analogico

Figura 4-25. Conversioni di segnale

Convertitore digitale/analogico

In un convertitore D/A, l'input è eguale o simile al codice parallelo che costituiva l'output del convertitore A/D (se il codice è in forma seriale, e deve essere convertito in forma parallela per essere usato da un convertitore D/A).
Il convertitore D/A emette un livello di tensione corrispondente al codice di input come illustrato in *Figura 4-25b.* Durante il periodo di campionatura, la tensione rimane a un livello costante e pertanto l'output ha livelli di tensione a gradini. L'output viene ricostruito in modo molto simile al suo originale di forma variabile facendo passare il segnale attraverso un amplificatore e un filtro, come mostrato. Quante più campionature A/D sono effettuate, tanto più il segnale filtrato D/A sarà simile a quello originale.

IL CALCOLATORE DIGITALE

Il cuore del sistema di controllo è di controllare o attualmente, in molti casi, un microcalcolatore. Al fine di essere classificato come calcolatore, un sistema deve soddisfare cinque criteri che vennero formulati da Charles Babbage nel 1830:

1. Deve avere una capacità di *input* in modo che si possano immettere dati ed istruzioni.

2. Deve avere una *memoria* per immagazzinare dati, istruzioni e risultati.

3. Deve essere in grado di effettuare *calcoli* usando operazioni arimetiche.

4. Deve essere in grado di prendere *decisioni* usando operazioni logiche e relazionali per effettuare azioni alternative usando dati di input e precedenti calcoli.

5. Deve avere una capacità di *output* per emettere i risultati delle sue operazioni.

Lo schema a blocchi del calcolatore digitale in *Figura 4-26* illustra quattro blocchi fondamentali che soddisfano i cinque criteri suddetti: un blocco di input, un blocco di memoria, un blocco di elaborazione centrale (CPU) e un blocco di output.
Il blocco di input consiste in uno o più canali di input per l'alimentazione alla CPU. Un particolare input viene selezionato dalla CPU immettendo il suo indirizzo sul bus di indirizzamento, e i dati sono trasferiti alla CPU tramite il bus di input dei dati. A seconda dell'architettura del sistema, questo bus trasferisce 4,8, 16 o 32 bit in parallelo. Ogni bus consiste di un fascio di conduttori isolati fra loro, con un conduttore per ogni bit da trasferire (per esempio, il trasferimento simultaneo di 8 bit richiede 8 conduttori).
La memoria deve essere in grado di immagazzinare codici binari ricevuti dalla CPU (operazione di scrittura) e di fornire alla CPU i codici binari che sono stati precedentemente memorizzati in una determinata posizione di memoria (operazione di lettura). La posizione di memoria viene selezionata dalla CPU usando il bus di indirizzamento, mentre i dati sono trasferiti attraverso bus di dati bidirezionali.
La memoria può consistere in una ROM o in una RAM a semiconduttori, in una memoria magnetica oppure in una loro combinazione. Nella maggior parte dei microcalcolatori la memoria consiste in ROM e RAM a semiconduttori, con dischi magnetici per la memorizzazione esterna di massa.

BUS DI INDIRIZZAMENTO DI INPUT/OUTPUT

INPUT
BUS DEI DATI DI INPUT
CPU
BUS DEI DATI DI OUTPUT
OUTPUT
SENSORI
BUS DI INDIRIZZAMENTO DI MEMORIA
BUS DEI DATI DI MEMORIA
ATTUATORI
MEMORIA

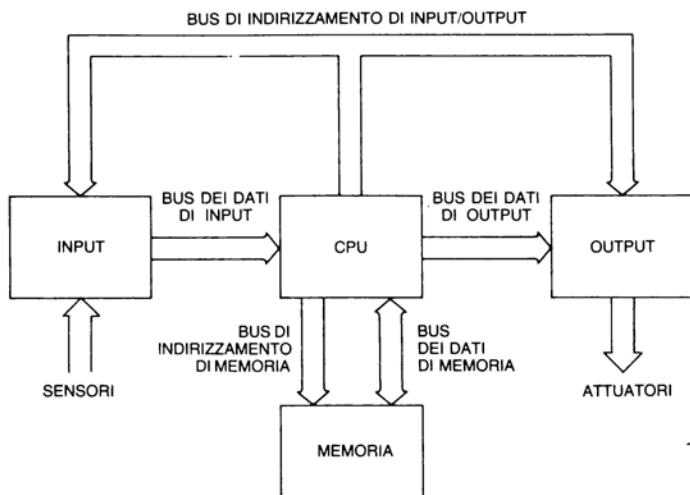



Figura 4-26. Tipico schema a blocchi di un calcolatore

Il cuore del calcolatore è la CPU, che controlla il funzionamento del calcolatore, decodifica (interpreta) ed esegue le istruzioni, effettua operazioni aritmetiche e logiche, riceve dati di input e emette dati di output. La CPU contiene numerosi registri contatori e dispositivi logici combinatori, genera tutti gli indirizzi che sono inviati sul bus di indirizzamento, e può anche effettuare dei compiti non standard basati sulla presenza di particolari codici di input chiamati segnali di interruzione (interrupt).
Il blocco di output invia i dati binari dalla CPU agli utenti delle informazioni. L'utente può essere costituito da stampanti, lampadine, visualizzatori a sette segmenti, schermi a raggi catodici, unità a dischi magnetici e unità a nastro magnetico. Alcuni dispositivi, come le unità a dischi magnetici e a nastro magnetico, sono unità sia di input che di output che servono come memorie esterne per memorizzazioni di massa.
Alcuni attuatori possono utilizzare direttamente i dati di output digitali, ma altri richiedono un convertitore digitale/analogico.

IL MICROPROCESSORE E IL MICROCALCOLATORE

Se la CPU è contenuta in un singolo circuito integrato, questo IC è chiamato microprocessore. Il primo microprocessore è stato sviluppato dalla Intel Corporation nel 1971.
Un microcalcolatore è un calcolatore la cui CPU è un microprocessore. La tecnologia a stato solido si è sviluppata al punto in cui è possibile porre la CPU, la memoria e le unità di input/output (I/O) in un singolo circuito integrato. Questi dispositivi sono chiamati microcalcolatori a chip singolo. La Texas Instruments ha sviluppato il primo microcalcolatore per calcolatrice a chip singolo e il primo calcolatore a 4 bit a chip singolo, rispettivamente nel 1971 e nel 1972.

La *Figura 4-27* rappresenta un microcalcolatore a chip singolo con un'identificazione delle sue unità. La CPU consiste nell'unità aritmetica e logica (ALU) e nella sezione di decodifica e controllo. La ROM ha 1.024 posizioni di memoria, ciascuna posizione può immagazzinare 8 bit di informazione, e la RAM ha 64 posizioni, ciascuna delle quali è di 4 bit. Il blocco dell'oscillatore di temporizzazione verrà analizzato fra breve.

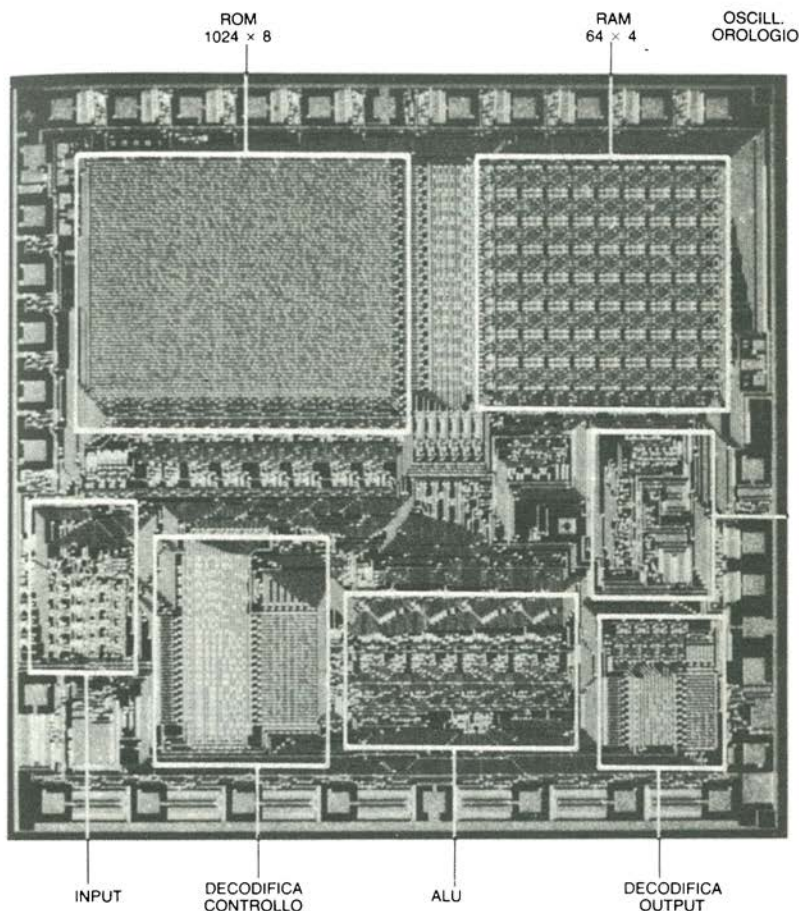



Figura 4-27. Microcalcolatore a chip singolo

Cosa fa il calcolatore

I calcolatori possono svolgere dei compiti molto complessi, ma in fasi incredibilmente semplici. Il loro funzionamento è molto prevedibile e il segreto del loro successo è la velocità con la quale operano, non la complessità di quanto essi fanno. Tutti i calcolatori effettuano una serie di operazioni basate sulle istruzioni fornite loro. L'insieme di istruzioni è chiamato programma, ed è molto simile alla ricetta di un piatto di cucina. L'esecuzione delle istruzioni nell'ordine prestabilito darà luogo all'output desiderato. Le istruzioni sono immagazzinate in sequenza in particolari posizioni di memoria sotto forma di codici binari, e ciascuna istruzione viene localizzata inviando il suo indirizzo alla memoria.
Per esempio, si supponga che sia richiesta la media di tre numeri A, B e C immagazzinati in memoria e che la risposta debba essere emessa su una stampante. Il gruppo di istruzioni potrebbe essere analogo al seguente:

1. Prelevare A dalla memoria e immagazzinarlo nel registro accumulatore della CPU.
2. Prelevare B dalla memoria, sommarlo ad A e immagazzinare il risultato nel registro accumulatore.
3. Prelevare C dalla memoria, sommarlo al contenuto del registro accumulatore e memorizzare il risultato nel registro accumulatore.
4. Dividere la somma per tre e immagazzinare il quoziente nel registro accumulatore.
5. Inviare il contenuto del registro accumulatore (la risposta) alla stampante.

L'esecuzione di questo programma richiederebbe soltanto pochi milionesimi di secondo. Per gli scopi di questo libro non è necessario essere un esperto in microcalcolatori, ma è sufficiente comprendere gli elementi fondamentali di quanto essi fanno e di come essi interagiscono con il controllo elettronico dei sistemi di automazione.

Come il microprocessore segue le istruzioni

Il funzionamento del microprocessore è governato da un segnale di temporizzazione principale, che è generato dal blocco di orologio della *Figura 4-27*. L'orologio genera un flusso costante di impulsi di output con una frequenza o ritmo predeterminato. Questo ritmo è chiamato ciclo di orologio. Per completare i compiti associati ad un'istruzione sono necessari vari cicli di orologio.
La più piccola unità di operazione in un microprocessore è chiamata ciclo di macchina. Consiste in due componenti: il ciclo di «prelevamento» e quello di «esecuzione». Durante il ciclo di prelevamento l'indirizzo della successiva istruzione viene inviato alla memoria e l'istruzione immagazzinata a quell'indirizzo viene riportata al microprocessore (cioè l'istruzione viene «prelevata»). Durante il ciclo di esecuzione il microprocessore esamina l'istruzione prelevata e intraprende alcune azioni basate su quell'istruzione (cioè, l'istruzione viene «eseguita»). Questo processo è ripetuto fino a quando l'elaborazione viene arrestata.

Come il microprocessore sa dove prendere la successiva istruzione

Nel microprocessore c'è uno speciale registro, chiamato registro di programma, che contiene sempre l'indirizzo della successiva istruzione. Quando il calcolatore viene acceso, i suoi registri e la memoria vengono preparati ad accettare un programma esterno. Questa preparazione viene chiamata inizializzazione. Dopo l'inizializzazione, il registro di programma contiene l'indirizzo della prima posizione di memoria che può immagazzinare un programma d'utente. Quando il programma viene immesso nella memoria, come esposto in precedenza, ciascuna istruzione viene immagazzinata in posizioni sequenziali che iniziano nella prima posizione assegnata. Successivamente, quando il programma viene «fatto girare», o eseguito, il registro di programma è predisposto per prelevare la prima istruzione. Dopo il primo prelievo il registro di programma viene fatto avanzare all'indirizzo della successiva istruzione sequenziale, e il programma continua in questo modo. In molti casi è la stessa istruzione prelevata che indica la posizione della successiva istruzione da prelevare.
Si consideri ancora il programma per l'esecuzione della media che è stato analizzato in precedenza. Si supponga che, quando il calcolatore viene inizializzato, il registro di programma sia impostato sulla posizione di memoria 001. Le istruzioni del programma per l'effettuazione della media potrebbero essere come quelle fornite in *Figura 4-28.* Durante il primo ciclo di macchina il microprocessore preleva l'istruzione nella posizione 001 che riguarda il caricamento di A; questo è rappresentato graficamente in *Figura 4-29a.* Il registro di programma contiene 002, cosicché il valore di A (che è 5) viene prelevato e posto nell'accumulatore, come indicato in *Figura 4-29b.* Il registro di programma ora contiene 003, e viene prelevata la successiva istruzione (ADD B). Il processo continua sino a quando viene prelevata l'istruzione nella posizione di memoria 008 (*Figura 4-29c*). Questra istruzione porta a 200 il contenuto del registro di programma (*Figura 4-29d*) e l'esecuzione continua con la successiva istruzione prelevata dalla posizione di memoria 200 (*Figura 4-29e*).

Posizione di memoria	Istruzione	Commenti
001	LOAD A	PORRE A NELL'ACCUMULATORE
002	A	DATO
003	ADD B	A + B NELL'ACCUMULATORE
004	B	DATO
005	ADD C	A + B + C NELL'ACCUMULATORE
006	C	DATO
007	DIVIDE 3	(A + B + C)/3 NELL'ACCUMULATORE
008	GO TO 200	SUCCESSIVA ISTRUZIONE ALLA POS. MEM. 200
009		
010		
200	STORE 300	METTERE LA RISPOSTA NELLA POS. MEM. 300
201	OUTPUT 2	INVIARE LA RISPOSTA AL DISPOSITIVO #2
202	STOP	FINE DEL PROGRAMMA
201	OUTPUT 2	OUTPUT ANSWER TO DEVICE # 2
202	STOP	END OF PROGRAM

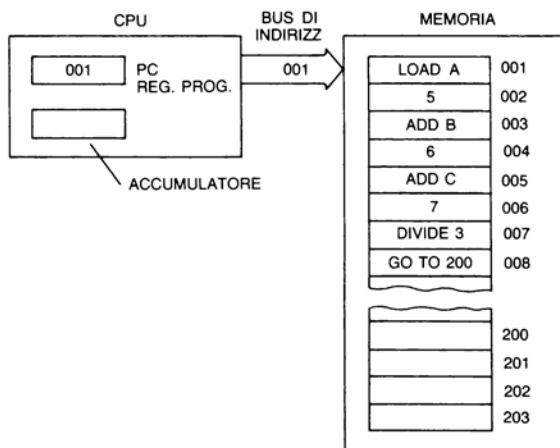
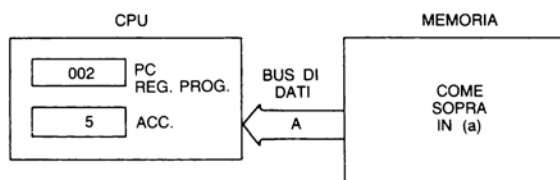
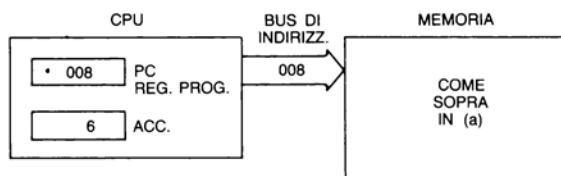
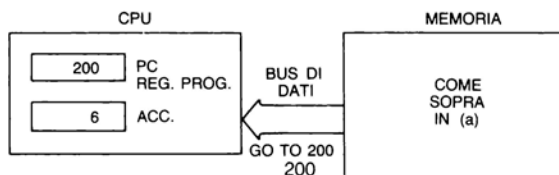
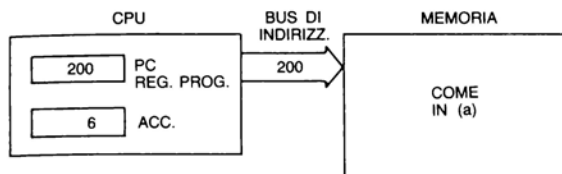
Figura 4-28. Programma per sommare tre numeri

a. Indirizzo della prima istruzione sul bus di indirizzamento

b. Prima istruzione sul bus di dati

c. L'istruzione di 008 è prelevata

d. L'istruzione a 008 è stata eseguita

e. Contenuto del bus di indirizzamento dopo (a)

Figura 4-29. Alcune fasi dell'esecuzione del programma

Solitamente il compito del programmatore consiste nello scrivere o immettere le istruzioni in opportuna sequenza senza preoccuparsi del modo in cui esse saranno immagazzinate in memoria, poiché questo compito verrà svolto direttamente dal calcolatore. Il grande vantaggio di un sistema di controllo programmabile è che le varie fasi di un programma possono essere modificate, aggiunte o cambiate per variare l'impiego senza cambiare l'hardware del sistema.

IL CONTROLLORE PROGRAMMABILE

Secondo la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) statunitense, un controllore programmabile (talvolta abbreviato PC, dalle iniziali di Programmable Controller) è un'apparecchiatura elettronica operante in modo digitale che usa una memoria programmabile per immagazzinare internamente le istruzioni per specifiche funzioni, come funzioni logiche, sequenziali, di temporizzazione, di conteggio e aritmetiche, allo scopo di controllare vari tipi di macchine o di processi tramite moduli di input/output digitali o analogici. I controllori programmabili sono disponibili da più di dieci anni, ma l'avvento del microprocessore ha fornito sia l'incentivo sia i mezzi per sviluppare una nuova serie di controllori programmabili con capacità superiori. Oltre cinquanta prodotti attualmente presenti sul mercato soddisfano la definizione NEMA di controllore programmabile, e le spese annuali per i sistemi impieganti controllori programmabili superano i tremila miliardi di lire.
La popolarità dei controllori programmabili è cresciuta in modo esponenziale, poiché sono piccoli, molto affidabili, poco costosi e, soprattutto, possono essere programmati da un elettricista o da un comune tecnico di stabilimento. I sistemi sono facilmente espandibili, e la localizzazione dei loro guasti è immediata.

Il controllore programmabile è un calcolatore?

Tenendo presente la definizione NEMA mentre si esamina la *Figura 4-26*, si rileverà facilmente che un controllore programmabile è un calcolatore. Deve inoltre essere un calcolatore particolarmente affidabile per sopportare un trattamento rude ed essere in grado di operare a temperature comprese fra 0 e 60°C, con umidità relativa del 95%. Inoltre deve essere schermato per poter operare correttamente in un ambiente in cui siano presenti interferenze elettriche.

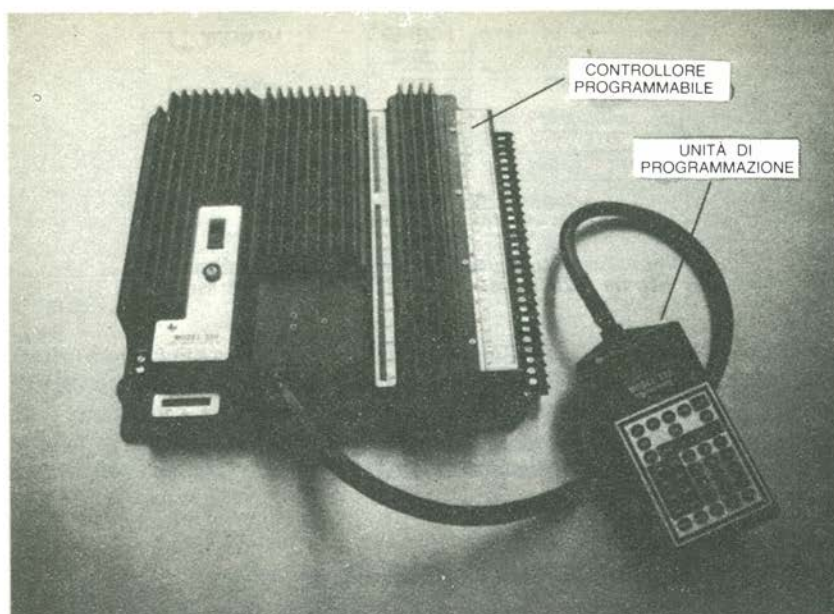



Figura 4-30. Controllore programmabile TI mod. 510

Il controllore programmabile 510 della Texas Instrumets, mostrato in *Figura 4-30*, è un buon esempio di una piccola unità di questo tipo che può essere usata per controllare sino a 20 relè, temporizzatori e contatori; quest'unità impiega un microprocessore e ha una RAM con 256 posizioni. La sua programmazione viene fatta mediante una tastiera che può essere tenuta in mano.

Il TI 510 ha dodici input, in gruppi di sei; che operano in corrente alternata o in corrente continua. Gli otto output possono essere a 120 volt in corrente alternata oppure a 24 volt in corrente continua. Poiché quest'unità ha una CPU, una memoria, degli input, degli output ed è programmabile, è un vero e proprio calcolatore.

La programmazione del controllore

I controllori programmabili hanno degli insiemi di istruzioni previsti appositamente per facilitare la programmazione per le applicazioni industriali, e la programmazione è prevista per essere translata da diagrammi a scala a relè a digitazione su tastiera. La facilità di interconnessione, l'ampia scelta di moduli di input e output e una semplice interfaccia con i sistemi di alimentazione industriale rendono queste unità molto utili per numerosi sistemi di controllo di fabbricazione. Un esempio pratico di applicazione verrà analizzato nel Capitolo 8.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. L'invenzione del transistore ha condotto a quella del circuito integrato, che ha dato origine alla vasta diffusione dei sistemi digitali.
2. I moduli dei circuiti logici combinatori (AND, OR, NOT, NAND, NOR) sono collegati per realizzare codificatori, decodificatori e selettori di dati. Questi circuiti e quelli sequenziali (flip-flop e latch) sono riuniti in circuiti ad alta densità sotto forma di circuiti integrati di elevate prestazioni, ridotta dissipazione di potenza, piccole dimensioni, alta affidabilità e basso costo.
3. L'amplificatore operazionale è un importante componente usato per poter essere usati per amplificare i segnali analogici nei sistemi di controllo.
4. I segnali analogici devono essere convertiti in segnali digitali per poter essere usati come input nei calcolatori digitali. Questa conversione viene effettuata da convertitori di tipo analogico/digitale.
5. I codici digitali provenienti dai sistemi digitali devono essere convertiti in segnali analogici per poter azionare gli attuatori dei sistemi di controllo. Questa conversione viene effettuata da convertitori di tipo digitale/analogico.
6. Un calcolatore ha componenti di input, output, CPU e memoria.
7. I circuiti logici combinatori e sequenziali vengono usati in unione fra loro per realizzare una CPU di calcolatore (micrprocessore) o anche un completo microcalcolatore sotto forma di circuito integrato. Un controllore programmabile è un importante calcolatore progettato appositamente per sistemi di automazione.

Quiz per il Capitolo 4

1. Il circuito integrato:
a. ha condotto allo sviluppo del transistore.
b. è sovente chiamato «chip».
c. ha rivoluzionato l'elettronica.
d. «b» e «c» sopra.

2. Un codificatore:
a. è usato per inviare segnali telegrafici
b. converte un segnale di input in un numero binario.
c. può avere soltanto quattro tasti.
d. converte un numero binario in un numero digitale.

3. Un flip-flop:
a. è un dispositivo logico sequenziale.
b. è un dispositivo logico combinatorio.
c. ricorda quello che è stato precedentemente immagazzinato in esso.
d. «a» e «c» sopra.

4. Il registro parallelo:
a. può memorizzare un numero binario a bit multipli.
b. usa flip-flop R-S.
c. viene cancellato dopo la lettura di una parola.
d. nulla di quanto sopra.

5. Un amplificatore operazionale:
a. può essere usato per sommare due o più segnali.
b. può essere usato per sottrarre due o più segnali.
c. usa il principio della retroazione.
d. tutto quanto sopra.

6. Un convertitore analogico/digitale:
a. cambia un segnale analogico in una sequenza di numeri binari.
b. cambia numeri binari di un tipo in un altro tipo.
c. richiede una campionatura con un ritmo pari alla metà della massima frequenza di input.
d. deve essere alimentato tramite un filtro.

7. Un convertitore digitale/analogico:
a. emette in output un codice binario.
b. richiede una campionatura con un ritmo pari alla metà della massima frequenza di input.
c. deve essere alimentato attraverso un filtro per riprodurre accuratamente il segnale originale.
d. «b» e «c» sopra.

8. Un microprocessore:
a. è una CPU in forma di circuito integrato.
b. è un sinonimo di calcolatore.
c. esegue un programma di istruzioni.
d. «a» e «c» sopra.

9. Il contatore delle istruzioni:
a. conta il numero di istruzioni che sono state eseguite.
b. decide quale programma far operare.
c. contiene l'indirizzo della successiva istruzione da eseguire.
d. è dove sono eseguite le operazioni aritmetiche in un calcolatore.

10. Quando un calcolatore preleva un'istruzione, il codice binario che rappresenta l'istruzione appare:
a. nel bus d'indirizzo I/O.
b. nel bus dei dati di memoria.
c. nel bus dei dati di output.
d. nel bus dei dati di input.

CAPITOLO 5

SOFTWARE/LINGUAGGI DI PROGRAMMAZIONE

IN QUESTO CAPITOLO

Il miglior sistema elettronico digitale e programmabile per il controllo di processo è privo di utilità se non riceve istruzioni per la sequenza di operazioni che deve effettuare e per quello che deve fare in qualsiasi situazione che possa presentarsi. In questo capitolo viene analizzato il metodo in base al quale le istruzioni sono sviluppate e memorizzate in un sistema di automazione, e il tipo di linguaggi disponibili per esprimere le istruzioni e descrivere le operazioni da effettuare.

COS'È IL SOFTWARE?

Il funzionamento di una convenzionale macchina elettromeccanica è determinato dal modo in cui le parti della macchina cooperano fra loro; pertanto, la posizione di un ingranaggio, di una leva, di una ruota o di un albero solitamente rivela la reazione della macchina per un qualsiasi movimento di una delle sue parti. La *Figura 5-1* mostra una semplice macchina elettromeccanica. Applicando energia al motore mediante la chiusura dell'interruttore, si provoca la rotazione del ventilatore. La velocità del ventilatore dipende da quella del motore, dalle dimensioni delle pulegge e dai rapporti degli ingranaggi.
Nei sistemi controllati da calcolatore non è sempre possibile tenere presente come è realizzata la macchina per determinare ciò che la macchina dovrà fare. Il calcolatore ha sostituito alcune convenzionali parti di macchina e il funzionamento del sistema è controllato da una serie di istruzioni immagazzinate nella sua memoria; il termine "software" si riferisce semplicemente ad una serie di istruzioni che dicono al calcolatore cosa deve fare in determinate circostanze.
Si ricordi che il calcolatore è collegato al sistema controllato tramite sensori e attuatori. Il software fa sì che il calcolatore azioni gli attuatori in una predeterminata sequenza passo a passo in funzione degli input provenienti dai sensori e dei calcoli fatti dal programma sulla base dei parametri del sistema.

Esempio di istruzioni

Come illustrazione, si consideri il sistema di raffreddamento in *Figura 5-2*. Ogniqualvolta un sensore di temperatura determina che la temperatura dell'acqua supera i 150°F,

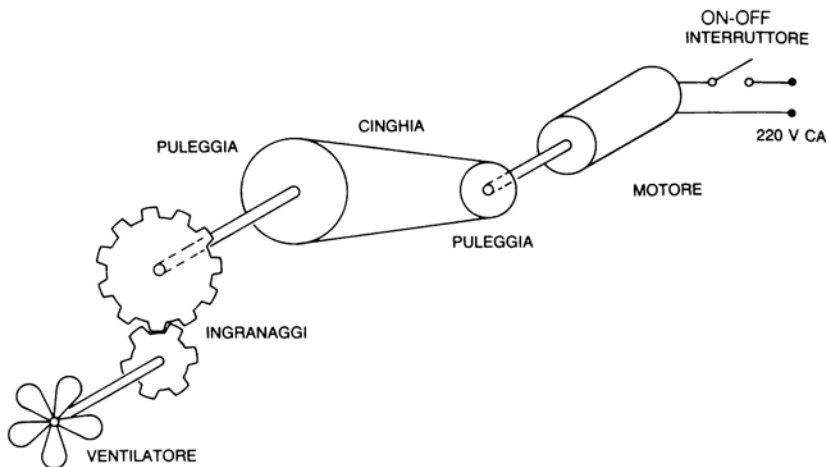



Figura 5-1. Una macchina elettromeccanica

corrispondenti a 65,6°C, deve essere azionato il ventilatore di raffreddamento; quando la temperatura dell'acqua scende al di sotto di 145°F (62,8°C), il ventilatore deve essere disinserito. Il calcolatore inserisce e disinserisce il ventilatore mediante un segnale di controllo che esso invia a un relè (l'attuatore). Le seguenti istruzioni sono in grado di effettuare l'operazione suddetta (si noti che non sono in linguaggio di calcolatore; i linguaggi di questo tipo saranno analizzati in seguito).

Fase	**Istruzione**
1	Leggere la temperatura dal sensore di temperatura.
2	Se la temperatura è meno di 150°F, andare alla fase 1.
3	Inserire il ventilatore di raffreddamento.
4	Leggere la temperatura dal sensore di temperatura.
5	Se la temperatura è maggiore di 145°F, andare alla fase 4.
6	Disinserire il ventilatore di raffreddamento.
7	Andare alla fase 1.

Le fasi sono svolte in sequenza, a meno che l'istruzione indichi al calcolatore di procedere in altro modo; per esempio, l'istruzione nella fase 7 richiede di tornare alla fase 1.

Tipi di istruzioni

Nelle diverse fasi possono essere identificati vari tipi di istruzioni. Le fasi 1 e 4 sono istruzioni di *input*, poiché immettono nel calcolatore dei dati provenienti da un sensore esterno. Analogamente, le fasi 3 e 6 sono istruzioni di *output*, poiché il calcolatore fornisce energia a un attuatore che produce un'azione di output. Le fasi 2 e 5 sono istruzioni di *salto condizionato* (conditional branch), poiché certe condizioni determinano se la fase successiva continua nella normale sequenza o se il programma deve saltare ad un'altra sequenza predefinita. La fase 7 è chiamata istruzione di *salto incondizionato* (unconditional branch), poiché essa riporta *sempre* la sequenza alla fase 1; in questo caso non vi sono condizioni. Le fasi 2 e 5 effettuano anche delle funzioni *aritmetiche*, poiché la temperatura reale deve essere sottratta da 150°F o 145°F per determinare quale azione deve essere intrapresa.
Le fasi 1 e 2 formano un *anello chiuso* (o loop) poiché l'elaboratore continuerà ad eseguirle sino a quando la temperatura sarà eguale o maggiore di 150°F. Anche le fasi 4 e 5 formano un anello chiuso e la fase 7 riporta l'intera sequenza in un terzo anello chiuso.

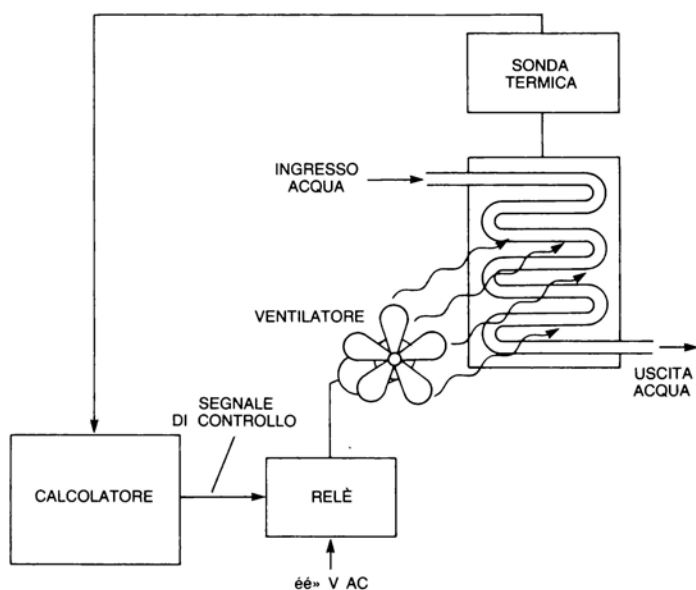



Figura 5-2. Sistema di raffreddamento controllato da calcolatore

LIVELLI DI LINGUAGGIO

Come si ricorderà dalla precedente esposizione, i calcolatori operano soltanto con numeri binari e pertanto qualsiasi istruzione, nella sua forma finale, deve essere sotto forma di 1 e di 0, ed è chiamata istruzione codificata binariamente o istruzione di linguaggio macchina. Il calcolatore quindi interpreta l'istruzione in codice binario ed effettua l'operazione specificata dall'istruzione stessa. Per esempio, l'istruzione 10110100 potrebbe far sì che l'elaboratore sommi due numeri.
Tutti i calcolatori hanno un gruppo di codici binari predefiniti, chiamati repertorio di istruzioni, che possono interpretare ed eseguire. Il repertorio dei microcalcolatori può essere costituito da solo settanta-ottanta istruzioni, mentre i grossi calcolatori possono averne più di duecento. Sfortunatamente, ciascun modello di calcolatore ha un differente repertorio di istruzioni. Il Digital Equipment Corporation VAX 11/780 ha un repertorio di istruzioni che non ha nulla in comune con quello di un Texas Instruments 990/12.
La quantità di conoscenze richiesta ad un programmatore per scrivere un programma è determinata dal livello di linguaggio. I livelli di linguaggio più basso richiedono uno studio ed un'esperienza notevoli, mentre quelli di livello più alto possono richiedere soltanto poche ore di orientamento e possono essere appresi con metodi autodidattici.

```
10110110
00000001
00101100
10000000
10010110
00101101
00100000
10001100
11111111
10110111
11001111
01001010
10110110
00000001
00101100
10000000
10010001
00101110
00110010
10000110
00000000
10110111
11001111
01001010
01111110
00000000
00100000
```

Figura 5-3. Istruzioni in linguaggio macchina

Linguaggio di macchina

La forma di un linguaggio di macchina è una stringa, o serie, di numeri binari consistenti di 1 e 0. La programmazione in linguaggio di macchina è quella di livello più basso, poiché può essere eseguita direttamente da un calcolatore.
La *Figura 5-3* rappresenta un programma con istruzioni scritte in linguaggio di macchina, e questo programma serve ad un particolare elaboratore per effettuare le fasi da 1 a 7 considerate nel precedente esempio di controllo del ventilatore di raffreddamento.
Esaminando la *Figura 5-3* si può rilevare come sia difficile e noioso programmare in linguaggio di macchina. È anche difficile trovare gli errori del programma (operazione di "debugging") ed è quasi impossibile che un'altra persona che guardi il programma possa comprendere come esso opera. A causa di questa difficoltà, non si programma quasi mai direttamente in linguaggio di macchina. Per programmare si usano solitamente dei linguaggi di livello superiore, e uno speciale programma, immagazzinato nel calcolatore, converte le istruzioni in linguaggio di livello superiore in codice di macchina.

Linguaggio assembly

Il successivo linguaggio di livello immediatamente superiore è chiamato assembly, o linguaggio assemblativo.
Il programma in linguaggio assembly di *Figura 5-4* corrisponde al programma in linguaggio macchina di *Figura 5-3*. In assembly il programmatore usa parole simboliche di tipo mnemonico, scelte in modo da richiamare (in lingua inglese) l'operazione che il calcolatore deve effettuare. Ciascuna parola simbolica normalmente corrisponde ad un'operazione del calcolatore, ma questa operazione può essere tradotta in più di un'istruzione in linguaggio di macchina. Per esempio, si confronti il numero di istruzioni in linguaggio di macchina di *Figura 5-3* con il numero di istruzioni in linguaggio assembly di *Figura 5-4*.

```
LOOP1   LDAA   TEMP
        SUBA   #150
        BLT    LOOP1
        LDAA   #$FF
        STAA   MOTOR
LOOP2   LDAA   TEMP
        SUBA   #145
        BGT    LOOP2
        LDAA   #$00
        STAA   MOTOR
        JMP    LOOP1
```

Figura 5-4. Istruzioni in linguaggio assembly

Ogni istruzione simbolica può avere una seconda parte che modifica il linguaggio mnemonico fornendo le informazioni addizionali (dati) necessarie al calcolatore per eseguire l'istruzione. Si consideri dapprima l'istruzione:

LDAA TEMP

Il significato di questa istruzione è: immettere nel registro accumulatore A il valore immagazzinato in una posizione di memoria chiamata TEMP. L'interpretazione degli altri comandi in LOOP1 è:

SUBA #150	Sottrarre 150 dal valore di temperatura immagazzinato nell'accumulatore A e mettere il risultato in A.
BLT LOOP1	Se il valore dell'accumulatore è inferiore a 0, andare alla istruzione LOOP1; altrimenti
LDAA #$FF	Immettere in A un determinato numero (che determinerà l'inserimento del motore).
STAA MOTOR	Immagazzinare il contenuto dell'accumulatore A in una posizione chiamata MOTOR (inserimento del motore del ventilatore).

I comandi in LOOP2 sono eguali ai precedenti, eccetto due:

BGT LOOP2	Se il valore nell'accumulatore è maggiore di zero, andare all'istruzione LOOP2; altrimenti
JMP LOOP1	Saltare all'istruzione LOOP1.

BLT e BGT sono istruzioni di salto condizionato, mentre JMP è un'istruzione di salto incondizionato. È evidente che il linguaggio assembly è molto più facile da usare del linguaggio macchina, poiché le istruzioni mnemoniche sono più facili da ricordare e da capire. Tuttavia, è ancora noioso programmare in assembly, poiché il programmatore deve prestare attenzione ad ogni dettaglio riguardante il contenuto dei registri, all'overflow/underflow, alle posizioni di memoria, ecc. Infatti, il programmatore deve controllare tutte le risorse del calcolatore, compresa l'assegnazione della memoria; queste operazioni sono collettivamente chiamate "housekeeping". Anche il linguaggio assembly dipende dalla macchina, e pertanto ogni modello di calcolatore ha il suo repertorio di istruzioni mnemoniche.

Linguaggi di alto livello

Con i linguaggi di alto livello il calcolatore effettua da solo le funzioni ausiliarie di housekeeping. Il programma interno che si prende cura di convertire le istruzioni di linguaggio di alto livello in codice di macchina è stato previsto per effettuare questi compiti, e non occorre che il programmatore conosca come sono risolti i problemi all'interno del calcolatore. Tuttavia, la quantità di programma interno richiesto per convertire le istruzioni in codice di macchina aumenta considerevolmente. Nei linguaggi di alto livello le istruzioni sono derivate dalla lingua inglese.

La *Figura 5-5* pone a confronto un'unica proposizione (statement) in linguaggio di alto livello con le sette proposizioni in linguaggio assembly per effettuare la media di cinque

numeri. I calcoli aritmetici decimali (chiamati a virgola mobile o "floating point") sono molto noiosi da effettuare con il linguaggio assembly, ma non è così con i linguaggi di alto livello. Nel programma in linguaggio assembly di *Figura 5-5* si suppone che la somma dei cinque numeri non sia maggiore della capacità di memorizzazione dell'accumulatore A (ovvero, si suppone che non si verifichi un "overflow" o superamento di capacità) e che il risultato della somma sia esattamente divisibile per cinque (ovvero che il quoziente non sia frazionario) o che sia accettabile un troncamento (cioè la parte frazionaria del quoziente sia trascurata senza arrotondamento). In caso contrario, si dovrebbero usare calcoli aritmetici a virgola mobile.

LINGUAGGIO DI ALTO LIVELLO:

```
Y = (X1 + X2 + X3 + X4 + X5)/5
```

LINGUAGGIO ASSEMBLY:

```
LDAA X1
ADDA X2
ADDA X3
ADDA X4
ADDA X5
DIVA  5
STAA  Y
```

Figura 5-5. Confronto tra proporzioni in linguaggio di alto livello e linguaggio assembly

I linguaggi di alto livello sono "linguaggi procedurali" poiché *consentono ai programmatori di concentrarsi sul problema da risolvere* anziché sui dettagli del controllo dei valori dei dati, delle lunghezze e degli spostamenti. Un ulteriore vantaggio dei linguaggi di alto livello è quello di avere una minore dipendenza dal tipo di macchina, e pertanto un programma scritto in un linguaggio di alto livello talvolta può essere usato su un diverso tipo di macchina con poche o nessuna modifica.

Esistono numerosi linguaggi di alto livello e alcuni di essi sono elencati in *Figura 5-6.* Alcuni sono di livello "più alto" di altri e richiedono all'utente una conoscenza molto ridotta della programmazione o del calcolatore sul quale i programmi devono operare. Sovente i programmi hanno un "comando a menu" mediante il quale l'utente si limita ad effettuare una scelta su una lista di alternative che vengono presentate su uno schermo in lingua inglese o italiana, e uno speciale programma "scrive" un programma applicativo per il compito da svolgere.

I più recenti linguaggi con "comando a menu" hanno una codifica ad immagine anziché una codifica a parole. Il "programmatore" fa muovere semplicemente un cursore sull'immagine che rappresenta l'azione necessaria usando un joystick o un dispositivo similare. Quando l'immagine è scelta, viene eseguita una serie di istruzioni predefinita dal fabbricante. Le immagini sono predisposte in sequenze per indicare passo a passo le azioni da eseguire.

Lo scopo dei linguaggi procedurali è quello di rendere accessibile l'uso del calcolatore a persone prive di conoscenze specifiche. Nella prossima decade la progettazione delle apparecchiature per controllare sistemi di automazione sarà grandemente influenzata dallo sviluppo di nuovi linguaggi di alto livello di tipo procedurale. Tuttavia, se una persona deve scrivere un programma, deve conoscere le cose che si possono fare con il linguaggio usato. Questo aspetto verrà analizzato in seguito.

Calcolatori universali		Calcolatori speciali	
FORTRAN	Scientifico	APT	Macchine utensili
ALGOL	Scientifico	ADAPT	Macchine utensili
PASCAL	Scientifico	GASP	Simulazione di sistema
BASIC	Scientifico e commerciale	CSMP	Simulazione di sistema
PL/1	Scientifico e commerciale	ECAP	Analisi circuitale
COBOL	Commerciale	SPICE	Analisi circuitale

Figura 5-6. Alcuni linguaggi di alto livello

LA SCRITTURA DELLE ISTRUZIONI

Si supponga di dover effettuare la sottrazione di due numeri. Come devono essere scritte le istruzioni nel linguaggio che si userà? Tutti i linguaggi hanno proprie regole. I vari componenti di un'istruzione sono chiamati campi, e il campo denominato *label* (o etichetta) permette di identificare l'istruzione al fine di potervi fare riferimento in seguito. In *Figura 5-4*, LOOP1 e LOOP2 sono dei campi label, e consentono di saltare a quelle istruzioni da altre istruzioni.
Il campo di *comando*, definisce l'istruzione che il calcolatore deve eseguire. In *Figura 5-4*, LDAA, SUBA, BLT, ecc. sono campi di comando. Nella proposizione in linguaggio di alto livello di *Figura 5-5* l'espressione per il calcolo della Y è un campo di comando. I linguaggi di medio e basso livello hanno anche un campo di *operando*, questo campo consente la modifica di quanto è presente nel campo di comando e consente inoltre di fornire l'informazione necessaria per effettuare il comando.
Numerosi linguaggi, infine, hanno un campo di *commento*. I commenti vengono ignorati dal calcolatore, e sono inclusi soltanto per le persone che hanno necessità di capire un programma per usarlo o per trovare gli eventuali errori.
Nell'istruzione:

HOGS CPR, A, B   Confrontare A e B

"HOGS" è il label; "CPR" è il comando per il confronto; "A" e "B" sono le variabili da confrontare, e "Confrontare A e B" è il commento.
Per l'istruzione:

247 DO 250 J = 1,10

08247" è il label dell'istruzione; "DO 250" è il comando; "J = 1,10" è l'operando. In questa proposizione non vi è alcun campo di commento.

Input/output

Un linguaggio di programmazione deve avere istruzioni che consentano al calcolatore di comunicare con i sensori, con gli attuatori e con gli altri elementi ad esso collegati, poiché i programmi devono avere istruzioni per immettere ed emmettere dati nel/dal sistema e per comunicare con l'operatore.

Si consideri:

500 INPUT "QUAL'È LA MASSIMA VELOCITÀ?";S

Questa proposizione fa sì che il messaggio fra virgolette appaia su uno schermo a raggi catodici o venga stampato per richiedere all'operatore di immettere il valore della velocità massima. Il valore scritto dall'operatore verrà assegnato a S e immagazzinato in memoria in una posizione tale che il calcolatore possa successivamente ritrovarlo.

Decisioni

Le conclusioni logiche sono tratte e i percorsi alternativi sono scelti sulla base dei valori delle variabili del sistema che viene controllato. Queste conclusioni sono solitamente sotto forma di proposizione IF (in lingua inglese "IF" significa se) del tipo:

IF X<Y THEN MAX: = Y
ELSE MAX: = X;

Anche degli elementi di logica booleana AND, OR, NOT, ecc. possono essere usati per determinare le scelte. Per esempio, l'istruzione

IF A = 5.0 AND B = 8.2 OR E = 5.77 THEN GO TO HOGS

farà sì che il programma salti all'istruzione identificata dal label HOGS e la esegua quando sono soddisfatte sia la condizione A = 5.0 sia la condizione B = 8.2 o se è soddisfatta la condizione E = 5.77. Negli altri casi viene eseguita la successiva istruzione nella normale sequenza di programma.

Calcoli matematici

Numerose funzioni di controllo richiedono che il controllore effettui complessi calcoli matematici. Questa esigenza viene facilmente soddisfatta dalla maggior parte dei linguaggi, poiché essi dispongono di routine (sottoprogrammi) per calcoli trigonometrici e aritmetici. Anche alcune speciali routine matematiche, come l'integrazione, sono disponibili in alcuni linguaggi come un singolo comando.

ESEMPI DI LINGUAGGI DI PROGRAMMAZIONE

Verranno ora descritti brevemente tre linguaggi di programmazione adatti per il controllo a calcolatore di sistemi di automazione. Questi linguaggi sono:

1. Linguaggio per il controllore programmabile TI510.
2. APT – il linguaggio che può essere usato per programmare macchine utensili a controllo numerico.

3. FORTRAN – il linguaggio che può controllare grandi e complessi sistemi di tipo continuo o discreto.

Non ci si prefigge qui di fornire informazioni dettagliate al punto di permettere a una persona di programmare in questi linguaggi, ma soltanto di consentire di valutare lo stile dei linguaggi e la facilità con la quale essi possono essere usati.

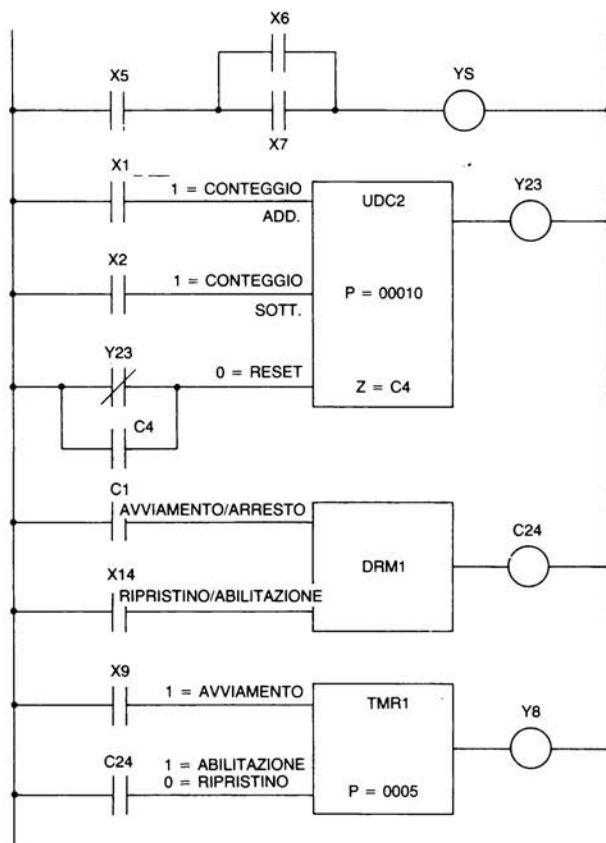



Figura 5-7. Diagramma logico a scala

Linguaggio di programmazione TI510 PC

Il linguaggio di programmazione TI510 viene usato per consentire il controllo mediante elaboratore di output basati su valori di input. La relazione input-output viene descritta per mezzo di una logica a scala.
I soli elementi presenti sono quelli di input e di output, i relè di controllo, i contatori e i temporizzatori.
I simboli per questi elementi sono rappresentati in un tipico diagramma a scala in *Figura 5-7.* I diagrammi a scala verranno spiegati nel Capitolo 8.
Il temporizzatore a tamburo equivale ad un'istruzione di 50 parole con una serie di output temporizzati (fino a 15) che sono sequenzialmente portati in ON mentre il tamburo esegue 16 fasi (passi). Il tempo fra le fasi è sotto il controllo del programmatore e consente l'esecuzione in sequenza di varie operazioni. L'input C1 avvia e arresta il temporizzatore a tamburo, ma non lo resetta. L'input X14 è la linea di ripristino/abilitazione (reset/enable). Se X14 è chiuso, il tamburo è abilitato e può essere avviato e arrestato usando C1. Il tamburo si sposta alla fase successiva quando tutte le condizioni della fase in atto sono state soddisfatte. C24 è un output esterno che viene attivato quando il temporizzatore ha completato la sua sequenza di operazioni.
Il contatore mostrato in *Figura 5-7* è del tipo bidirezionale (è possibile impiegare anche contatori solo di tipo additivo e sottrattivo variando soltanto gli input necessari). L'input inferiore del contatore lo resetta o lo abilita. Se l'input è aperto, il contatore è disabilitato e resettato. L'input superiore fa sì che il contatore conti additivamente ogni volta che X1 viene chiuso. Analogamente, l'input intermedio fa sì che il contatore conti sottrattivamente ogni volta che X2 viene chiuso. L'output Y23 viene abilitato per resettare il contatore quando esso ha raggiunto il suo valore prestabilito o è sceso a 0. P è il valore di conteggio prestabilito (10 in questo esempio) e Z è un dispositivo di output che viene abilitato quando il conteggio raggiunge lo 0.
L'altro temporizzatore (TMR1) viene avviato quando X9 è chiuso, a condizione che anche C24 sia chiuso. Il temporizzatore si decrementa da un valore prestabilito (il massimo è 32.767) a 0, con un decremento ogni 16,67 millisecondi. In questo esempio, il valore prestabilito è 5, e pertanto 16,67 X 5 ovvero 83,35 millisecondi dopo l'avviamento del temporizzatore, l'output Y8 viene abilitato. L'apertura C24 arresta il temporizzatore in qualsiasi momento e lo resetta al suo valore prestabilito. La chiusura di C24 abilita il temporizzatore per l'uso.

Repertorio di istruzioni di base

Il repertorio di istruzioni per questo linguaggio consiste di sole 5 istruzioni:

Codice mnemonico	Azione
STR	Memorizzazione
OUT	Emissione
AND	Componenti in serie
OR	Componenti in parallelo
NOT	Azione inversa

L'istruzione STR viene usata per indicare l'avviamento di ciascun nuovo gradino nel diagramma a scala.

Esempio di programma

Queste istruzioni verranno ora impiegate per descrivere il sistema di *Figura 5-7*. Il primo gradino è semplice e può essere scritto come segue:

```
STR X5
AND X7
OR X6
OUT W5
```

Il contatore bidirezionale è programmato specificando una delle sue tre linee di input, e quindi specificando il contatore stesso; poi sono indicati il valore di conteggio e l'elemento da abilitare quando il conteggio raggiunge lo 0. Per il contatore UDC 2 di *Figura 5-7* il programma sarebbe:

```
STR X1
STR X2
STR NOT Y23
OR C4
UDC 2
10
C4
OUT Y23
```

Analogamente, il programma per il temporizzatore sarebbe:

```
STR X9
STR C24
TMR 1
5
OUT Y8
```

Il temporizzatore a tamburo è semplice e viene affrontato nello stesso modo; pertanto una sua analisi non aggiungerebbe nulla alla comprensione di questo tipo di linguaggio di programmazione. La sua programmazione è molto dettagliata e non viene qui riportata per motivi di spazio.

LINGUAGGIO APT

Il linguaggio APT (il cui nome deriva da **A**utomatically **P**rogrammed **T**ools) è ampiamente utilizzato negli Stati Uniti per controllare il posizionamento, il percorso continuo e i movimenti di controllo di una macchina utensile. È un linguaggio di alto livello con varie centinaia di istruzioni nel suo repertorio. Queste istruzioni possono essere raggruppate in quattro categorie: di geometria, di moto, di post processore e ausiliarie.

Istruzioni di geometria

È necessario descrivere la posizione di punti e superfici sul pezzo da lavorare in modo tale che lo spostamento dell'utensile possa essere definito e specificato rispetto a questi punti e superfici. Il linguaggio APT adotta un sistema di coordinate del tipo mostrato in *Figura 5-8.* Il movimento traslatorio viene descritto in termini di dimensioni nelle direzioni X, Y e Z, e il movimento rotatorio viene descritto in gradi attorno agli assi X, Y e Z. L'analisi verrà qui limitata al movimento traslatorio supponendo che il pianale di lavorazione sia nel piano X-Y.
Una proposizione di geometria in APT ha la seguente forma:

Simbolo = tipo di geometria/descrizione.

Per esempio, per specificare un punto viene scritto:

P1 = POINT/1.7, -3.4, -2.5

dove 1.7, -3.4 e -2.5 sono le coordinate X, Y e Z del punto indicato con P1 (le coordinate devono essere fornite nell'ordine X, Y, Z). Il punto P1 è rappresentato in *Figura 5-8.*

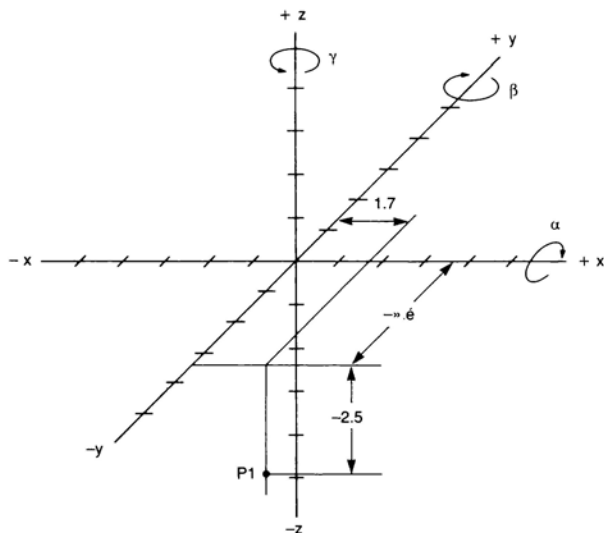



Figura 5-8. Sistema di coordinate per il linguaggio APT

Un punto può essere definito anche come intersezione di due linee definite in precedenza:

P1 = POINT/INTOF, L5, L7

In questo caso L5 e L7 sono linee definite in precedenza. Per esempio, L5 potrebbe essere definita come:

L5 = LINE/P2, P3

dove P2 e P3 sono punti definiti in precedenza.
Per definire un cerchio, il cerchio deve essere nel piano X-W e può essere descritto in un certo numero di modi. Due modi sono i seguenti:

CIRC1 = CIRCLE/CENTER, PNT, RADIUS, 3.7
CIRC2 = CIRCLE/P1, P2, P3

CIRC1, ovvero il cerchio 1, è descritto situando il centro in un punto PNT precedentemente definito, e assegnando il raggio di 3,7. CIRC2, ovvero il cerchio 2, è descritto dai punti P1, P2 e P3 precedentemente definiti sulla circonferenza del cerchio.
Un piano può essere identificato come:
PLN1 = PLANE/P1, P2, P3
in cui il piano passa per tre punti precedentemente definiti. Si può anche descrivere un piano facendo riferimento ad un altro piano precedentemente definito. Per esempio:

PLN 2= PLANE/P1, PARLEL, PLN1

definisce il piano PLN2 che passa per il punto P1 ed è parallelo al piano PLN1 precedentemente definito.

Esempio

Si utilizzi questo tipo di istruzioni per descrivere il pezzo mostrato in *Figura 5-9*. Devono essere descritte le superfici superiore e inferiore, il perimetro e la posizione del foro. Una descrizione di geometria in ATP potrebbe essere:

```
P1 = POINT/4.0, 0.0, 0.0
P2 = POINT/4.0, 4.0, 0.0
P3 = POINT/3.0, 2.0, 0.0
P4 = POINT/1.0, 3.0, 0.0
P5 = POINT/1.0, 1.0, 0.0
L2 = LINE/P1, P2
C1 = CIRCLE/CENTER, P4, RADIUS, 1.0
C2 = CIRCLE/CENTER, P5, RADIUS, 1.0
C3 = CIRCLE/CENTER, P3, RADIUS, 0.25
L1 = LINE/P1, LEFT, TANTO, C2
L4 = LINE/LEFT, TANTO, C2, LEFT, TANTO, C1
L3 = LINE/P2, RIGHT, TANTO, C1
PL1 = PLANE/P1, P2, P4
PL2 = PLANE/0.0, 0.0, -0.75
```

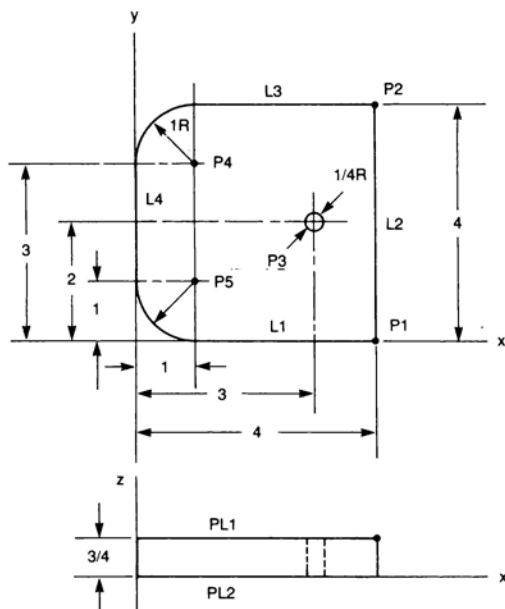



Figura 5-9. Un pezzo da lavorare

Per le parti L1 e L4 può essere utile una spiegazione. L1 è una linea che passa per il punto P1 ed è tangente (TANTO) alla parte sinistra del cerchio C2, come visto da P1. L4 è tangente a C2 e C1 sul lato sinistro, come visto dal primo cerchio menzionato nell'istruzione, che in questo caso è C2.

Istruzioni di moto

Le istruzioni di moto sono usate per descrivere il percorso di movimento di una macchina utensile. La forma di un'istruzione di moto è:

COMANDO DI MOTO/DESCRIZIONE

Il comando indica cosa deve essere fatto, e la descrizione indica dove deve essere fatto. Due tipi di moto sono il moto da punto a punto (PTP) e l'inseguimento di contorno (moto continuo). Prima di usare l'uno o l'altro tipo, deve essere fornito un punto di partenza (punto di riferimento o posizione inziale dell'utensile) con l'istruzione FROM. Per esempio:

FROM/2.0, 3.0, 2.0

definisce che l'utensile deve essere inizialmente situato 2 unità a destra, 3 unità dietro e 2 unità sopra l'origine degli assi di riferimento del pezzo in lavorazione.

I due comandi PTP sono:

GOTO sposta l'utensile al punto descritto
GODLTA sposta l'utensile alla distanza descritta rispetto all'ultima posizione dell'utensile.

Se l'utensile è situato a (1.0, 2.0, 0.0) e deve essere spostato a (2.5, 3.0, 1.0), l'istruzione deve essere:

GOTO/2.5, 3.0, 1.0

oppure

GODLA/1.5, 1.0, 1.0

Facendo nuovamente riferimento alla *Figura 5-9*, se la posizione di base (di riposo) della punta del trapano è situata alle coordinate (0, 0, 1), le seguenti istruzioni faranno trapanare il foro centrato in P3 (supponendo che sia montata la punta richiesta):

Istruzione	**Commento**
FROM/0.0, 0.0, 1.0	Posizione iniziale
GOTO/P3	Porta la punta del trapano al punto 3
GODLTA/0.0, 0.0, -1.25	Fa penetrare la punta nel pezzo
GODLTA/0.0, 0.0, 1.25	Ritrae la punta
GOTO/0.0, 0.0, 1.0	Riporta la punta alla base

Per usare le istruzioni di contorno devono essere definite tre superfici:

1. La superficie che guida la *parte laterale* dell'utensile.
2. La superficie che guida la *parte inferiore* dell'utensile.
3. La superficie che *arresta* il movimento dell'utensile.

Le sei istruzioni di contorno sono:

GOFWD	GOLFT	GOUP
GOBACK	GORGT	GODOWN

La direzione «in alto», «in basso», «a sinistra», ecc. (UP, DOWN, LEFT) viene fornita rispetto all'ultima superficie che arresta il movimento dell'utensile. Il comando GOTO deve essere usato prima di definire il punto di partenza di tre superfici.

Esempio

Facendo nuovamente riferimento alla *Figura 5-9*, se l'utensile di taglio deve seguire il perimetro della parte rappresentata (supponendo che i punti, le linee, i cerchi e i piani precedentemente definiti siano parte del programma), si potrebbero usare le seguenti istruzioni di contorno:

Istruzione	Commento
FROM/2.0, 3.0, 2.0	Posizione iniziale dell'utensile
GOTO/L1, TO, PL2, TO, L2	Punto di partenza per la lavorazione (P1).
GOLFT/L1, TANTO, C2	Muove da P1 lungo L1 sino a raggiungere C2.
GOFWD/C2, PAST, L4	Muove attorno al cerchio C2.
GOFWD/L4, TANTO, C1	Muove verso il cerchio C1.
GOFWD/C1, PAST, L3	Muove lungo il cerchio C1.
GOFWD/L3, PAST, L2	Muove lungo L3 verso L2.
GORGT/L2, PAST, L1	Muove lungo L2 verso L1.

Con le istruzioni di geometria e di moto che sono state elencate si potrebbe scrivere un programma PAT per spostare un utensile verso un punto o lungo una superficie di qualsiasi parte tridimensionale. Le due restanti categorie di istruzioni APT controllano la macchina utensile in sé stessa e forniscono un'ulteriore flessibilità di programmazione.

Istruzioni di postprocessore

È importante poter controllare la macchina utensile per quanto riguarda la sua velocità, l'entità di avanzamento, l'attivazione, ecc. Questa categoria di istruzioni è usata proprio per questi scopi. Alcuni esempi di comandi disponibili per il programmatore sono:

Comando	Descrizione
MACHIN	Specifica la macchina utensile da usare
FEDRAT	Specifica l'avanzamento per la macchina utensile in pollici al minuto
COOLNT	Determina la fuoriuscita o l'intercettazione del liquido di raffreddamento

Istruzioni ausiliarie

Queste istruzioni rappresentano un insieme di comandi necessari o facoltativi per il programmatore. Alcuni esempi sono:

Comando	Descrizione
CUTTER	Definisce il diametro dell'utensile di taglio
FINI	Indica la fine di tutte le operazioni
PARTNO	Definisce il numero di parte del pezzo da lavorare

FORTRAN – UN COMPLESSO LINGUAGGIO DI ALTO LIVELLO

I primi due linguaggi di alto livello che sono stati presi in considerazione hanno delle applicazioni piuttosto limitate, ciononondimeno rappresentano un'importante classe di linguaggi che può essere incontrata da una persona che debba programmare dei sistemi di automazione. Il FORTRAN è un linguaggio di applicazione più generale; è un linguaggio ad orientamento matematico e viene usato soprattutto per decisioni ed analisi basate su elaborazioni di dati numerici. Il suo nome deriva da "FORmula TRANslator", che significa "traduttore di formule".
Il FORTRAN verrà presentato soprattutto con un esempio, poiché la maggior parte dei testi relativi all'insegnamento di questo linguaggio superano le 100 pagine. Le conoscenze potranno essere approfondite esaminando i tipi di proposizione aritmetiche, di controllo e di input/output.

Proposizioni aritmetiche

In *Figura 5-10* sono elencate le istruzioni aritmetiche in base ad alcune funzioni matematiche disponibili. Queste istruzioni possono essere combinate in una frase del tipo:

X = A**1 + SIN ((B*C)/(2. – D)) – SQRT (4./Y)

Funzione	Esempio	Spiegazione
+	C = A + B	Addizione
–	C = A – B	Sottrazione
*	C = A * B	Moltiplicazione
/	C = A/B	Divisione
**	C = A ** 3	Elevazione a potenza (A^3)
LOG10	C = LOG10 (A)	Logaritmo in base 10
EXP	Y = EXP (B)	Esponenziale
SQRT	X = SQRT (D)	Radice quadrata
ATAN	Y = ATAN (X)	Arcotangente
SIN	Z = SIN (B)	Seno
ABS	C = ABS (X)	Valore assoluto
MAX	Y = MAX(X1,X2,X3)	Valore massimo

Figura 5-10. Alcune funzioni matematiche in FORTRAN

La gerarchia (ordine) per la valutazione è la seguente:
1. Espressioni fra parentesi.
2. Elevazione a potenza.
3. Funzioni come SIN e SQRT.
4. Moltiplicazione e divisione.
5. Addizione e sottrazione.

Istruzioni di controllo

Le istruzioni di controllo sono quelle che alterano o controllano la normale sequenza di esecuzione delle istruzioni di programma.

Istruzioni GO TO

Queste istruzioni trasferiscono il controllo, in modo condizionato o incondizionato, ad un altro punto del programma. Un esempio di una istruzione GO TO incondizionata è:

GO TO 500

dove 500 è l'etichetta (label) di un'istruzione del programma. Questa istruzione è la successiva ad essere eseguita. Una modifica dell'istruzione GO TO è:

GO TO (10, 15, 18, 35, 81), J

In questo caso il controllo è trasferito a una delle etichette fra parentesi sulla base del valore J. Per esempio, se J è 3, il controllo viene trasferito all'istruzione 18.
Un esempio di istruzione GO TO condizionata è:

IF (X**2 – 5.2) 10, 20, 30

Questa istruzione riguarda l'espressione $X^2 - 5.2$ (naturalmente, a X deve essere stato precedentemente assegnato un valore). Se il risultato è minore di zero il programma si porta all'istruzione 10; se è uguale a zero si porta all'istruzione 20; se maggiore di zero si porta all'istruzione 30.

Ciclo DO

Il ciclo DO è un altro tipo di istruzione GO TO. La forma è:

10 DO 30 I = 1,100

Tutte le istruzioni da 10 a 30, incluse, saranno valutate con $I \leqslant 1$, poi con $I \leqslant 2$, ecc sino a I = 101. A questo punto il controllo viene passato alla prima istruzione che segue la 30.

Istruzioni di input/output

Queste istruzioni vengono usate per regolare il flusso dei dati dalle unità di input (tastiere, nastri, dischi, lettori di schede, ecc.) al calcolatore, e dal calcolatore alle unità di output (stampanti, nastri, dischi e schermi a raggi catodici). Le due istruzioni fondamentali sono READ e WRITE, rispettivamente di lettura e scrittura. Per esempio:

READ (5, 8) A, B, N

fa sì che l'elaboratore legga i dati per A, B e N da qualsiasi dispositivo che sia identificato come unità logica 5, e la lettura viene effettuata in conformità al formato indicato nell'istruzione 8. Le istruzioni WRITE hanno identica forma. Un'istruzione di formato per un'istruzione READ potrebbe essere:

8 FORMAT (F2.2, F5.1, I3)

I numeri fra parentesi definiscono rispettivamente il formato di lettura dei dati A, B e N. F definisce la virgola mobile, e I indica un intero. I numeri di formato definiscono le cifre nel numero che deve essere letto. Per esempio F2.2 significa che il numero da leggere ha la virgola mobile con due cifre su entrambi i lati della virgola. I3 significa che il numero è un intero con un massimo di tre cifre.

Un esempio di programma

In un determinato processo di fabbricazione, sono stati misurati cinque valori di pressione durante l'effettuazione del processo, e questi valori sono stati registrati su nastro magnetico in un opportuno formato. Il sistema deve analizzare i dati per trovare la pressione massima e per calcolare la pressione media; inoltre, se la differenza fra due qualsiasi dati adiacenti è maggiore di 8.1, i dati sono sbagliati, e pertanto occorre arrestare i calcoli e stampare un messaggio di errore per richiamare l'attenzione dell'operatore. Si supponga che l'unità a nastro di input sia l'unità logica 2 e che la stampante di output sia l'unità logica 4. Un programma in FORTRAN in grado di svolgere questa funzione è fornito in *Figura 5-11.*

Figura 5-11. Esempio di programma FORTRAN

CHE COSA SI È APPRESO?

1. Il software è una serie di istruzioni che controlla il funzionamento di un sistema di automazione.

2. La forma in cui sono scritte le istruzioni dipende dal calcolatore che le deve eseguire e dal linguaggio scelto per esprimerle.

3. I linguaggi vengono classificati in conformità alla loro facilità di impiego.

4. I linguaggi di basso livello sono molto efficienti, ma richiedono un notevole studio e una conoscenza del calcolatore sul quale verranno utilizzati.

5. I linguaggi di alto livello sono molto più facili da utilizzare. Possono dipendere dalla macchina, come il repertorio di istruzioni TI515 PC, o essere molto versatili come i linguaggi APT e FORTRAN.

Quiz per il Capitolo 5

1. Il software è:
   a. un output per una stampante.
   b. una serie di istruzioni.
   c. un linguaggio di programmazione.
   d. un input a nastro.

2. Quale dei seguenti sono tipi di istruzioni?
   a. Input.
   b. Aritmetiche.
   c. Salto condizionato.
   d. Tutto quanto sopra.

3. Un linguaggio di programmazione:
   a. definisce la forma delle istruzioni.
   b. dipende sempre dal tipo di macchina utilizzata.
   c. non dipende mai dal tipo di macchina utilizzata.
   d. nulla di quanto sopra.

4. Un'istruzione in linguaggio assembly:
   a. è scritta con 1 e 0.
   b. corrisponde a una singola operazione del calcolatore.
   c. non richiede conoscenza della struttura del calcolatore.
   d. nulla di quanto sopra.

5. Quale dei seguenti viene considerato un linguaggio di alto livello?
   a. Linguaggio di macchina.
   b. FORTRAN.
   c. Linguaggio assembly.
   d. Tutto quanto sopra.

6. I linguaggi di alto livello:
   a. sono procedurali.
   b. sono molto difficili da utilizzare.
   c. richiedono una conoscenza della struttura del calcolatore.
   d. non possono essere usati con sistemi automatici.

7. Appaiare quanto segue:
   a. Il campo di label
   b. Il campo di comando
   c. Il campo di operando
   d. Il campo di commento

   1. identifica una specifica istruzione.
   2. spiega la funzione dell'istruzione.
   3. definisce l'operazione da effettuare.
   4. fornisce maggiori informazioni sul campo di comando.

8. Quale dei seguenti elementi può essere usato con un TI510 PC?
   a. Temporizzare a tamburo.
   b. Temporizzatore a nastro perforato.
   c. Metronomo.
   d. Luce lampeggiante.

9. Il linguaggio APT è usato con:
   a. grandi sistemi di automazione.
   b. controllori programmabili.
   c. sistemi grafici.
   d. macchine a controllo numerico.

10. Il FORTRAN è:
   a. un linguaggio di medio livello.
   b. dipendente dalla macchina.
   c. un linguaggio con orientamento matematico.
   d. tutto quanto sopra.

11. Quale delle seguenti istruzioni è in linguaggio di macchina?
   a. ADD 5
   b. 10001101
   c. GOTO XOUT
   d. Nessuna di esse.

12. Un utensile posizionato in (4.0, - 2.0, 3.5) deve essere portato a (3.0, 3.5, 1.0) con un'istruzione GODLTA. Si scelga la corretta istruzione:
   a. GODLTA (1.0, – 5.5., 2.5)
   b. GOTO (–1.0, 3.5, 1.0)
   c. GODLTA (–1.0, 1.5, –2.5)
   d. GODLTA (1.0, 5.5, 4.5)

13. Quale delle seguenti sono istruzioni di contorno in linguaggio APT?
   a. GOLFT
   b. GOTO
   c. PLN1
   d. L3

14. Un contatore bidirezionale usato in un controllore programmabile TI510 ha tre input. Quale dei seguenti non è uno di questi input?
   a. Conteggio additivo.
   b. Conteggio di uscita.
   c. Conteggio sottrattivo.
   d. Reset.

15. Se il valore in un temporizzatore di un TI510 è 8, quanti millisecondi sono necessari fra il momento in cui il temporizzatore è avviato e quello in cui viene abilitato l'output?
   a. 8
   b. 133,36
   c. 49,88
   d. 275,41

16. Quale delle seguenti rappresenta un'istruzione di salto condizionato?
   a. BGT LOOP5
   b. GOTO 50
   c. X = 5 + Y
   d. JMP MOTOR

17. Quale delle seguenti è un'istruzione FORTRAN?
- **a.** STR NOT Y15
- **b.** GORGT L5, PAST, L3
- **c.** X = R – T/5.0
- **d.** 10101111

18. Tutti i calcolatori usano lo stesso repertorio di codici binari.
- **a.** Vero.
- **b.** Falso.

19. Nell'istruzione, 500 SUBA #50 il campo di comando è:
- **a.** 500
- **b.** #50
- **c.** SUBA
- **d.** "b" e "c" sopra.

20. Il linguaggio più semplice da usare per scrivere un programma lungo e complesso è:
- **a.** Il FORTRAN.
- **b.** Il linguaggio assembly.
- **c.** Da punto a punto.
- **d.** Il linguaggio di macchina.

CAPITOLO 6

CONTROLLO DI PROCESSO CONTINUO

IN QUESTO CAPITOLO

Nel Capitolo 2 sono stati analizzati i differenti tipi di sistemi di controllo che sono disponibili, e il presente capitolo è una continuazione di quell'analisi con lo scopo primario di porre in evidenza come sono progettati i sistemi di controllo continuo. Verranno inoltre descritte alcune applicazioni e verranno forniti esempi di sistemi di controllo continuo che impiegano un controllore programmabile o un microcalcolatore.

DEFINIZIONI DI PROCESSO CONTINUO

Nel glossario sono fornite le definizioni dei seguenti termini comunemente usati nelle applicazioni di controllo di processo:

Variabile di processo
Variabile controllata
Variabile manipolata
Disturbo
Variabile di carico
Controllo continuo
Valore prefissato
Ritardo di sistema
Ritardo di trasferimento
Tempo morto
Controllo analogico
Controllo digitale

L'esempio del sistema di controllo della temperatura dell'acqua calda in *Figura 6-1* verrà ora nuovamente usato per porre alcuni di questi termini in relazione con un sistema di controllo di processo continuo. In *Figura 6-1* la *variabile controllata* è la temperatura dell'acqua, la *variabile di carico* è la richiesta di acqua calda, il *valore prefissato* è la desiderata temperatura dell'acqua calda (impostata dall'operatore), il *disturbo* è l'aggiunta incontrollata di acqua fredda che viene immessa in risposta alle richieste del carico e la *variabile manipolata* è la quantità di vapore alimentato al serbatoio. Il *ritardo di sistema* è il tempo che trascorre fra il momento in cui si apporta nuovo calore al serbatoio e il momento in cui la risposta viene rilevata dal sensore della temperatura dell'acqua. La valvola di immissione del vapore esercita un *controllo continuo* che può essere regolato in qualsiasi punto del suo campo, da tutto chiuso a tutto aperto; e non

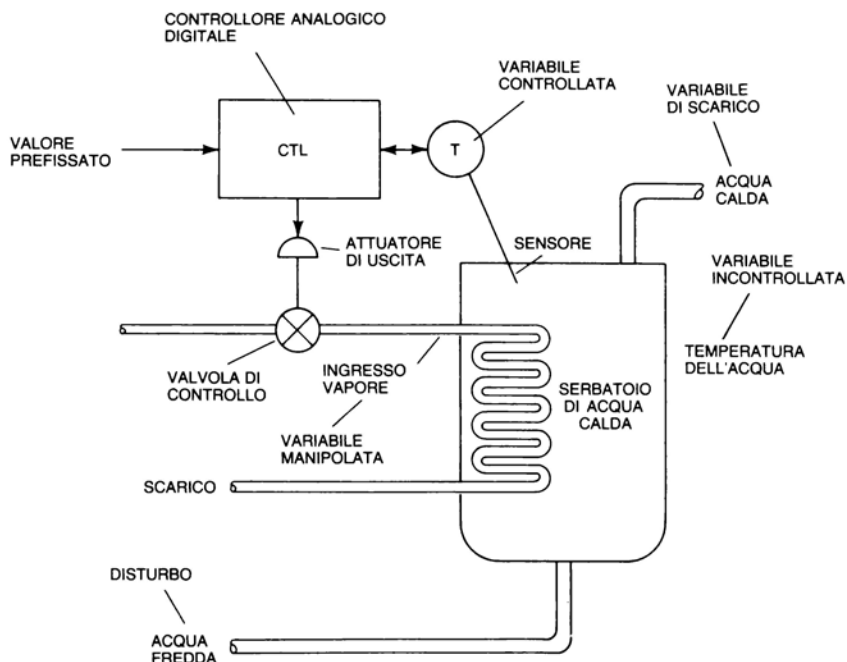



Figura 6-1. Controllo di processo continuo

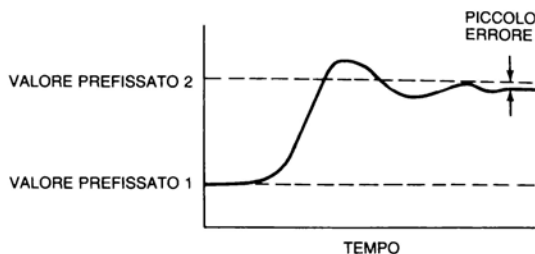
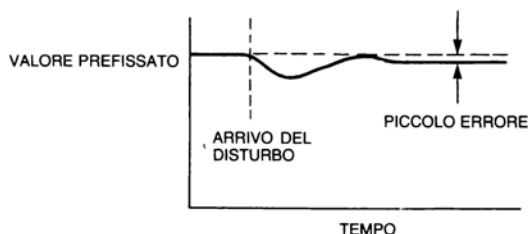
è quindi un semplice controllo ON/OFF come si potrebbe trovare in un sistema di controllo di tipo discreto.
In un controllo di processo continuo un valore prefissato dall'operatore viene confrontato continuamente con l'output della variabile controllata, e se fra loro non vi è coincidenza viene generato un segnale di errore che è proporzionale alla differenza fra il valore prefissato e l'output della variabile controllata. Questo segnale di errore viene usato dal controllore per modificare il segnale emesso dal modulo di controllo in modo che il segnale abbia un'ampiezza e una polarità tali da ridurre l'entità dell'errore.
Se il processo controllato è leggermente sottosmorzato, come esposto nel Capitolo 2, la risposta a un cambiamento nel valore prefissato sarà del tipo mostrato in *Figura 6-2a* e la risposta a un disturbo sarà del tipo mostrato in *Figura 6-2b*. Cioè, dopo la variazione iniziale prodotta dal cambiamento di valore prefissato o dal disturbo, il processo si stabilizza a un nuovo valore con un piccolo sorpassamento (overshoot) ma senza oscillazioni prolungate. Il sistema, se correttamente progettato, ridurrà l'errore a un livello che assicura in uscita un prodotto accettabile.

a. Cambiamento nel valore prefissato

b. Cambiamento dovuto a un disturbo

Figura 6-2. Risposta con smorzamento critico a ciclo chiuso per un sistema proporzionale

TIPI DI CONTROLLORI

Come esposto nel Capitolo 2, i quattro tipi di sistemi di controllo comunemente impiegati per il controllo di processo continuo sono:

1. Proporzionale (P)
2. Proporzionale-integratore (PI)
3. Proporzionale-derivatore (PD)
4. Proporzionale-integratore-derivatore (PID)

Questi sistemi verranno dapprima considerati singolarmente e poi saranno analizzati i modi composti. L'analisi sarà basata sui sistemi analogici.

Controllo proporzionale

L'equazione in *Figura 6-3a* viene risolta dal controllore proporzionale, e la risposta di errore è tracciata in *Figura 6-3b.* Se l'output è maggiore del valore prefissato, viene immesso nel controllore un errore negativo in modo che l'output si riduca, e pertanto l'errore diminuisca. Se l'output è minore del valore prefissato, avviene l'opposto. L'equazione è una serie di linee rette con pendenza eguale al fattore di guadagno proporzionale K_p, e con una ordinata di polarizzazione H(0) lungo l'asse Y che corrisponde al valore nominale prefissato. È opportuno che il sistema sia previsto in modo che il valore nominale prefissato sia verso metà campo, per consentire un'ampia risposta lineare ad errori in entrambe le direzioni. Se il valore prefissato è vicino ad un'estremità del campo lineare, in una direzione sarà possibile un'azione proporzionale molto ridotta e per questa correzione il funzionamento sarà simile a quello di un controllore ON/OFF. Durante il funzionamento, l'output del controllore sarà eguale a un valore di polarizzazione (per spostare il valore prefissato verso metà campo) più o meno un'entità proporzionale alla differenza fra il valore prefissato e la variabile controllata (l'errore).
Con un controllo proporzionale, ogniqualvolta la variabile controllata differisce dal valore prefissato, il controllore cambierà la variabile manipolata in modo da correggere l'errore. Un problema che si presenta con un controllo proporzionale è che, in presenza di un disturbo permanente, questo tipo di controllo non sarà in grado di riportare la variabile controllata al valore prefissato. Il motivo consiste nel fatto che il controllore proporzionale

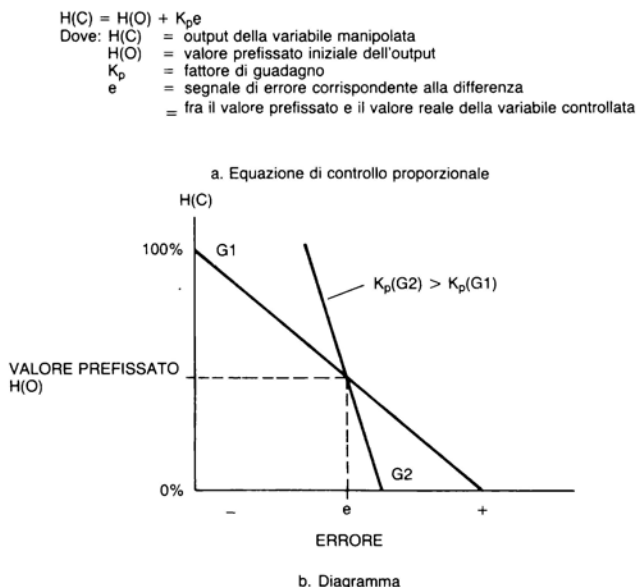



Figura 6-3. Risposta di output di un controllo proporzionale in relazione all'errore

si basa su un segnale di errore per cambiare la variabile manipolata, e quando la variabile controllata si avvicina al valore prefissato, il segnale di errore diminuisce e questo a sua volta riduce il segnale di correzione della variabile manipolata. A seguito di ciò la variabile controllata raggiungerà un punto di equilibrio, come mostrato in *Figura 6-2*, che sarà un po' al di sotto del valore prefissato e darà luogo ad uno scostamento residuo in condizioni di equilibrio. Se si cerca di eliminare l'errore aumentando il guadagno dell'anello di controllo, il sistema di controllo tenderà a produrre delle oscillazioni non smorzate. L'unico modo per eliminare questo errore usando soltanto il modo di controllo proporzionale consiste nel regolare manualmente la polarizzazione del valore prefissato H(0) a un nuovo punto di equilibrio.

Controllo analogico proporzionale

Il circuito amplificatore operazionale di *Figura 6-4* fornisce il controllo proporzionale dell'equazione in *Figura 6-3*. Questa equazione è la somma di due quantità lineari e pertanto per risolverla può essere usata una semplice giunzione sommatrice di un amplificatore operazionale. Un input è il valore prefissato e l'altro è il valore di errore. Il fattore di guadagno K_p dell'input di errore per l'equazione è R2/R1; il guadagno di input per il valore prefissato è R2/R3, ma poiché R3 =R2, il guadagno è 1 e l'output è

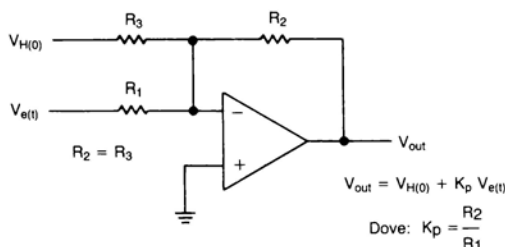



Figura 6-4. Realizzazione di un controllo analogico proporzionale

uguale all'input. Questa, naturalmente, è una soluzione molto semplice, e per un dato controllore o per una specifica applicazione probabilmente verrebbero usati differenti fattori di guadagno. Solitamente il fattore di guadagno può essere regolato dall'operatore usando per R2 un resistore variabile. Così, quando il sistema è installato, il guadagno proporzionale può essere prefissato per ciascuna particolare applicazione.

Un esempio di applicazione esclusivamente proporzionale sarebbe un sistema di posizionamento a sincro, come quello mostrato in *Figura 6-5a*. Un sincrotrasmettitore è un dispositivo che converte la posizione di un albero in segnali elettrici, e un sincroricevitore fra la funzione inversa. Il sincrotrasmettitore viene collegato all'albero di output di un sistema e invia segnali fasati in corrente alternata ad un ricevitore

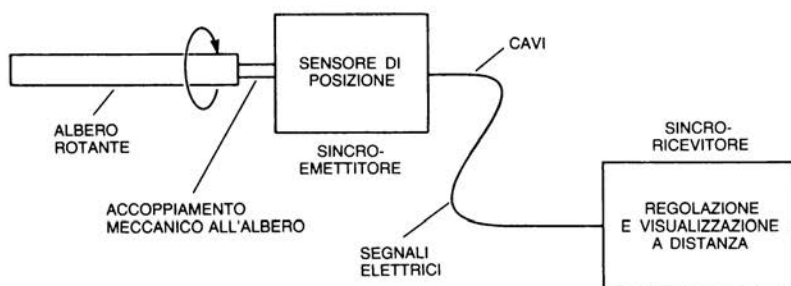
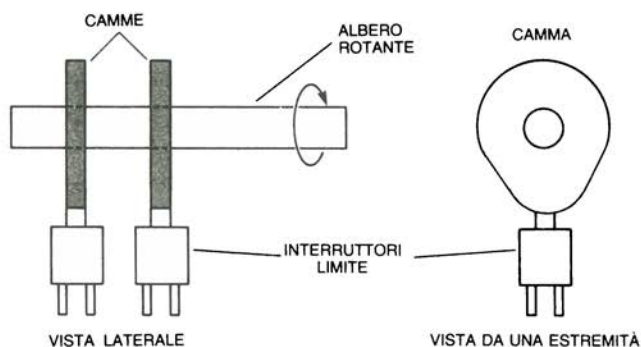
(sincroricevitore) in una stazione di controllo lontana per indicare la posizione dell'albero. L'output dall'unità sincroemettitrice può essere pensato come una tensione che varia continuamente in funzione dell'angolo dell'albero. In pratica questa tensione è una sinusoide, e l'output è proporzionale alla differenza di fase fra la sinusoide così generata e una sinusoide di riferimento. Come risultato dell'accoppiamento con l'output del sincroemettitore, il sincroricevitore seguirà la posizione del sincroemettitore. Questo sistema viene frequentemente usato nella formatura per estrusione e nei treni di laminazione dell'acciaio, e si tratta essenzialmente di un sistema di controllo proporzionale che indica la posizione dell'albero. Il sistema, tuttavia, non è molto efficace quando si verificano forti cambiamenti di velocità, poiché non è in grado di rispondere con sufficiente accuratezza. Questo è analogo all'errore di spostamento di equilibrio considerato in precedenza.

a. Sistema di posizionamento a sincro

b. Interruttori limite azionati a camme per la temporizzazione in sequenza di processi ripetitivi

Figura 6-5. Sistema di sensori per posizionamento proporzionale

$$H(C) = \frac{1}{Ti} \int_0^t e\,dt \longrightarrow H(C) = \frac{1}{Ti} \Sigma \frac{(e_i + 1 - e_i)}{(t_i + 1 - t_i)}$$

Dove: H(C) = valore di output
Ti intervallo di integrazione (velocità di ripristino)
e segnale di errore
Σ simbolo di sommatoria

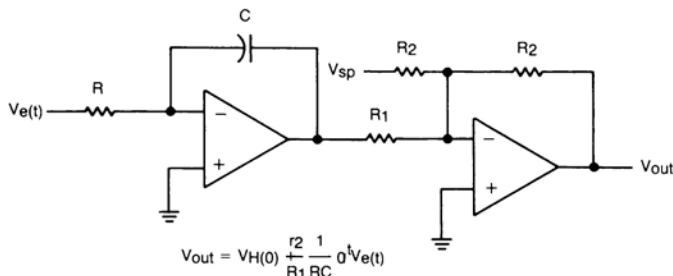
a. Equazione

b. Circuito

Figura 6-6. Realizzazione di un controllo integrato analogico

In altre applicazioni si usano degli interruttori limite che attivano particolari operazioni e sono azionati da camme poste sull'albero di un sincroricevitore lontano, come mostrato in *Figura 6-5b*. La particolare operazione desiderata viene prescelta alla stazione centrale regolando il sincroemettitore.

Controllo analogico integrato

L'equazione di controllo per un controllore integratore è fornita in *Figura 6-6a*. T_1 è un incremento di tempo $(t_{i+1} - t_i)$, mentre e è l'errore durante quell'incremento di tempo $(e_{i+1} - e_i)$. Il segnale di errore viene moltiplicato per la lunghezza di tempo in cui l'errore è presente, e gli errori relativi a tutti i piccoli incrementi di tempo sono sommati assieme; in matematica questa operazione è chiamata integrazione ed è indicata dal simbolo $\int$. Il valore finale integrato viene continuamente sommato e aggiunto al precedente segnale, sino a raggiungere il cambiamento necessario per annullare l'errore. A questo punto, il segnale smetterà di cambiare, ma l'output del controllore potrebbe risultare molto differente dal valore prefissato inizialmente, a differenza di quanto avviene nell'esempio di controllo proporzionale che cerca sempre di riportare il valore della variabile manipolata al suo valore prefissato mentre l'errore viene ridotto.
I circuiti amplificatori operazionali con appropriati componenti di retroazione possono

essere usati anche per fornire un controllo integrato. Un circuito esemplificativo e la relativa equazione sono mostrati in *Figura 6-6b*. Questa equazione corrisponde all'equazione di *Figura 6-6a*. Il valore prefissato V_{sp} è una costante indipendente dal tempo, cosicché viene sommata in un semplice stadio di guadagno simile a $V_{H(0)}$ nell'esempio del controllore proporzionale. In questo circuito il funzionamento del primo stadio dell'amplificatore operazionale inizialmente ritarda l'effetto del segnale di errore sull'output del controllore, poiché tutti i cambiamenti di output sono retroazionati all'input tramite il condensatore C con una polarità tale da opporsi al cambiamento. Tuttavia, se l'errore persiste, la reazione negativa si riduce mentre il condensatore si carica e l'output risulta sempre più influenzato dal segnale di errore. Alla fine questa azione eliminerà l'errore nella variabile di controllo, supponendo che essa possa essere opportunatamente controllata dall'equazione che viene utilizzata.
La costante di tempo RC della retroazione nel primo stadio determina l'effetto che la porzione integrante avrà sull'output. Quanto più lunga è la costante di tempo, tanto minore sarà l'effetto di integrazione. Viceversa, se la costante di tempo viene diminuita, l'integrazione avrà un effetto maggiore. T_i è il tempo di integrazione, e il suo reciproco è la velocità di ripristino. Quanto più lunga è la costante di tempo, tanto più bassa è la velocità di ripristino e tanto maggiore è l'effetto del modo di funzionamento integrale sul processo controllato.

Controllo analogico derivato

Un altro utile modo di controllo è quello derivato, e anch'esso può essere ottenuto usando amplificatori operazionali. La *Figura 6-7a* riporta l'equazione di controllo risolta dal circuito rappresentato in *Figura 6-7b*. L'equazione in *Figura 6-7b* è la stessa equazione in termini di componenti circuitali, con la tensione variabile di controllo V_I sostituita al segnale di errore, e RC al posto di $1/T_d$. Si noti che in questo circuito le posizioni di R e C sono scambiate rispetto a quelle di *Figura 6-6*; questa disposizione ha l'effetto di reagire soltanto alle variazioni della velocità di cambiamento della variabile controllata. Come risultato, questa disposizione ha una risposta molto scadente per i cambiamenti molto lenti dei parametri del processo.
Scegliendo opportunamente i valori, il circuito di controllo derivato può anticipare gli errori del sistema reagendo prontamente ai cambiamenti nella velocità di variazione (gradiente) di una variabile. Questo ha l'effetto di rendere più rapida la risposta di controllo e di mantenere meglio il valore prefissato. In pratica, come mostrato in *Figura 6-7b*, viene usata la variabile controllata anziché il segnale di errore stesso al fine di evitare una scorretta risposta agli impulsi.
In questo modo, il guadagno è impostato regolando la costante di tempo della rete RC, e solitamente ciò viene fatto regolando il valore del resistore. Quanto più grande è il valore del resistore, tanto maggiore è la costante di tempo e tanto maggiore è l'effetto del circuito derivatore sulla risposta di controllo. Viceversa, quanto minore è la costante di tempo, tanto minore è l'effetto sulla risposta. Come nel modo integrato, questa costante di tempo è comunemente individuata dal suo reciproco, che è chiamato controllo di velocità. Quanto più alto è il controllo di velocità, tanto minore è l'effetto che il sistema derivato avrà sulla risposta del controllo.

$$H(C) = T_d \frac{de}{dt} \longrightarrow H(C) = T_d \frac{(e_{t_1} - e_{t_0})}{(t_1 - t_0)}$$

Dove: T_d = tempo di derivazione
e = segnale di errore
$t_1 - t_0$ = intervallo di tempo

a. Equazione

R

C

V_I = CONTROL VARIABILE

V_{out}

Dove: Guadagno di derivazione $T_d = RC$

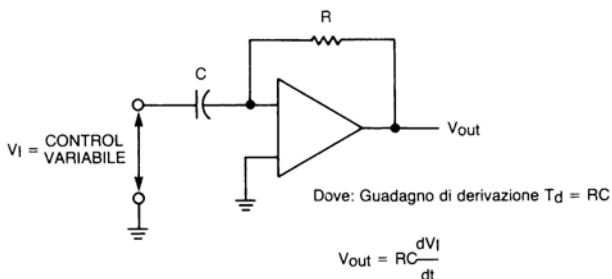
$$V_{out} = RC \frac{dV_I}{dt}$$

b. Circuito

Figura 6-7. Realizzazione di un controllo derivato analogico

MODI COMPOSITI

Ciascuno dei tre modi di controllo continuo, se è usato separatamente, ha dei problemi che ne limitano l'efficacia. Nella maggioranza dei casi, uno dei problemi può essere controllato da uno degli altri modi. Pertanto, usando due o più modi in combinazione si può ottenere un migliore controllo, ma il sistema deve essere progettato e regolato affinché ciascun modo sia usato nelle migliori condizioni.
Solitamente, in un sistema correttamente regolato il controllo derivato domina a breve termine e il controllo proporzionale è il più efficace nel periodo di tempo da breve a medio che segue una risposta a gradino. Il controllo integrato è d'aiuto a lungo termine per annullare tutti gli errori rilevati e riportare il sistema al valore prefissato quando cambiano dei parametri non controllati.

Modo PI

Il controllo proporzionale-integrato (PI) probabilmente è il controllo composito più usato nell'industria. Il controllo PI è utile in situazioni in cui vi siano ampie variazioni di carico che richiedono notevoli cambiamenti nel valore prefissato. La porzione di integrazione può regolare ciò molto bene e inoltre elimina lo scostamento residuo che si verifica con

il solo controllo proporzionale. Quando varia il carico, l'uso del modo proporzionale dà luogo ad una risposta più rapida (di quella del solo integrato). Il controllo PI è molto efficace in sistemi in cui le variazioni di carico avvengono lentamente, poiché dei cambiamenti rapidi di carico possono determinare una instabilità del sistema se il tempo di integrazione non è scelto opportunatamente. Un altro vantaggio del controllo PI è che la proporzione di integrazione elimina lo scostamento residuo del solo controllo proporzionale. Pertanto la banda proporzionale può essere scelta più ampia (minor fattore di guadagno proporzionale) e questo aiuta ad abbassare il sorpassamento (overshoot) nella risposta del sistema. L'equazione soddisfatta dal modo PI è una combinazione dell'equazione di controllo proporzionale e di controllo integrato ed è:

$$H(C) = H(0) + K_p e + K_p \frac{1}{T_i} \int_0^t e\,dt$$

Dove: e = segnale di errore
K_p = guadagno proporzionale
T_i = tempo di integrazione
$H(0)$ = valore prefissato

Come rilevabile da questa equazione, il guadagno totale è influenzato dal fattore di guadagno proporzionale, e il fattore di guadagno integrato può essere controllato indipendentemente in modo da ottenere il guadagno integrato totale desiderato.

Modo PD

Il controllo proporzionale derivato (PD) non è molto usato nelle applicazioni di controllo industriale poiché non elimina l'errore di scostamento residuo del modo di controllo proporzionale; risponde soltanto a cambiamenti di secondo ordine, cioè a cambiamenti nel segnale di errore e non al segnale di errore stesso. Il controllo PD può essere utile nei sistemi che hanno rapidi cambiamenti di carico, poiché tende ad anticipare l'errore totale rispondendo in funzione della rapidità con la quale cambia il segnale d'errore. In generale, quanto più rapida è la velocità di cambiamento dell'errore, tanto maggiore sarà l'errore totale.
Il controllo PD viene usato nei sistemi a servomotori che hanno piccoli ma rapidi cambiamenti nei parametri di processo. L'equazione per il controllo PD è:

$$H(C) = H(0) + K_p e + K_p T_d \frac{de}{dt}$$

Dove: e = segnale di errore
K_p = guadagno proporzionale
T_d = tempo di derivazione
$H(0)$ = valore prefissato

Si noti che l'interazione fra la risposta proporzionale e la risposta derivata è indicata dalla moltiplicazione di K_p (il fattore di guadagno proporzionale) per T_d (il fattore derivato). L'interazione può essere controllata regolando opportunamente i due fattori di guadagno, dato che essi sono impostabili indipendentemente.

Modo PID

Il controllo composito che soddisfa essenzialmente tutte le necessità di controllo di processo industriale è il proporzionale-integrato-derivato (PID). Questo controllo, che inizialmente venne sviluppato impiegando una logica di tipo pneumatico, è molto diffuso ed è l'elemento di confronto per tutti i circuiti di controllo di processo continuo. Il modo PID può essere usato praticamente per tutte le applicazioni, regolando opportunamente ciascun anello sulle particolari costanti di tempo e sui fattori di guadagno richiesti.
Come si può prevedere, l'entità di integrazione nell'impostazione dei parametri in un sistema di controllo PID è maggiore che per ogni altro tipo di controllo sinora discusso.
L'equazione per il controllo PID è:

$$H(C) = H(0) + K_p e + K_p \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt - K_p T_d \frac{dvc}{dt}$$

Dove: K_p = guadagno proporzionale
T_i = intervallo di tempo di integrazione
T_d = intervallo di tempo di derivazione
e = errore
vc = variabile controllata
H(0) = valore prefissato

Come appare dall'equazione, l'entità di regolazione disponibile e l'entità di interazione per ciascuna regolazione richiede una buona conoscenza del sistema per ottenere la risposta ottimale dell'anello di controllo; non è sufficiente usare il modo PID, occorre usarlo in modo corretto.
Vi è un punto ottimale per ciascuno dei fattori di guadagno del sistema; un effetto troppo piccolo comporta un ridotto controllo del sistema, e un effetto troppo grande può dar luogo ad oscillazioni o anche a un sistema instabile in cui possono esservi delle oscillazioni la cui ampiezza aumenta col passare del tempo.
Poiché le regolazioni necessarie richiedono un'attività addizionale, il modo PID dovrebbe essere usato soltanto se questa attività addizionale fornisce un reale miglioramento nella risposta di controllo del sistema e se questo miglioramento è effettivamente necessario, altrimenti il modo PI può essere più facile da impiegare.
Nella maggior parte dei controllori di processo continuo di tipo dedicato l'equazione PID è già risolta e il tecnico addetto al controllo deve soltanto determinare i parametri del sistema per immettere le appropriate equazioni di ciclo, come specificato dal controllore. Se non è necessario l'intero controllore PID, si possono assegnare dei valori nulli ai parametri del sistema e a quella parte del sistema che non interessa.

METODI DIGITALI

Per risolvere le equazioni lineari di controllo del processo, anziché usare dei circuiti analogici si può usare un calcolatore digitale. I segnali analogici sono convertiti in dati binari, e operazioni come l'addizione, la sottrazione, la moltiplicazione e la divisione possono essere usate per risolvere tutte le equazioni di controllo del processo che sono

state sinora considerate. Devono essere sviluppati degli algoritmi di software per effettuare operazioni come la derivazione, l'integrazione, l'estrazione di radici quadrate, ecc.; una volta che questo è stato fatto, quegli algoritmi possono essere usati ogniqualvolta siano necessari per risolvere le equazioni del processo.

In *Figura 6-8* è illustrato un esempio grafico di calcolo della velocità di cambiamento di una variabile di controllo usata per un sistema di controllo derivato. Il metodo usato in un controllore consiste nel dividere il tempo in intervalli discreti e nel rilevare l'errore in ciascun punto. La derivata è semplicemente l'inclinazione di ciascuno di questi segmenti e può essere calcolata per ogni segmento dividendo la differenza della variabile di controllo per l'intervallo di tempo.

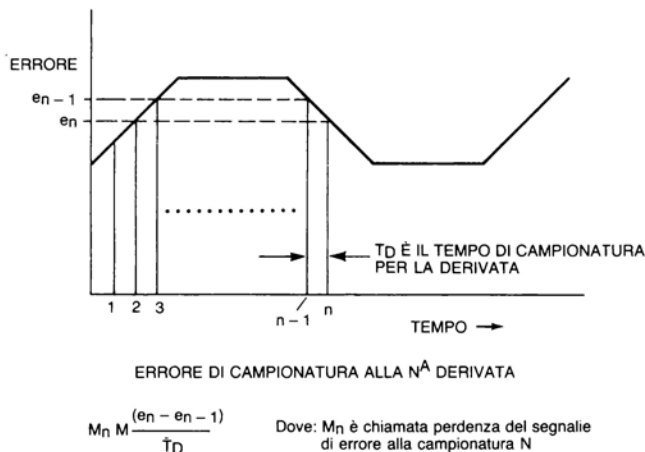



Figura 6-8. Soluzione grafica della derivata

Di norma in un controllore l'integrazione viene effettuata in modo analogo. Un esempio grafico è riportato in *Figura 6-9*. Il tempo è diviso in intervalli fissi e in ciascun intervallo viene misurato l'errore; si suppone quindi che l'errore sia costante durante quell'intervallo di tempo. L'integrazione consiste nel sommare le aree di una serie di rettangoli, e questa sommatoria è chiamata integrale dell'errore rispetto al tempo. Da ciò deriva il nome del controllo integrato.

CONFIGURAZIONI DI SISTEMA

Sistema centralizzato

Un sistema di controllo centrale è particolarmente utile in un grande impianto con lavorazioni interdipendenti dove si devono controllare numerosi processi di tipo differente per sfruttare efficientemente gli impianti e i materiali. Questo tipo di sistema fornisce

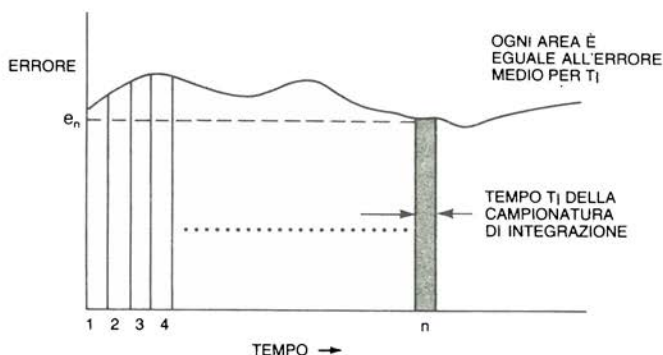



Figura 6-9. Soluzione grafica dell'integrazione

anche un punto centrale dove possono essere segnalati gli allarmi e dal quale i processi possono essere cambiati senza doversi spostare continuamente da un punto all'altro dello stabilimento. La costruzione di un sistema centralizzato impiegante controllori analogici richiede che tutti i sensori e gli attuatori siano collegati al posto centrale di controllo, in modo da poter visualizzare singolarmente tutte le informazioni di ciascun luogo distante.
Uno schema a blocchi di un sistema centrale analogico è illustrato in *Figura 6-10*. Il posto centrale di controllo è il locale dove si trovano tutti i calcolatori di controllo, sebbene ogni calcolatore abbia una circuiteria essenzialmente indipendente dagli altri. Le limitazioni di questo tipo di controllo sono l'incapacità di trasmettere segnali analogici su lunghe distanze senza aggiungere disturbi al segnale; questa limitazione riduce la risoluzione e l'accuratezza generale del sistema.

Controllo ibrido

Il controllo ibrido è un misto di un'elaborazione ad anello di controllo analogico e di una trasmissione digitale dei segnali, per trarre vantaggio dalla facilità d'uso del controllo analogico e della immunità dal rumore e dalla ridotta spesa di collegamento della

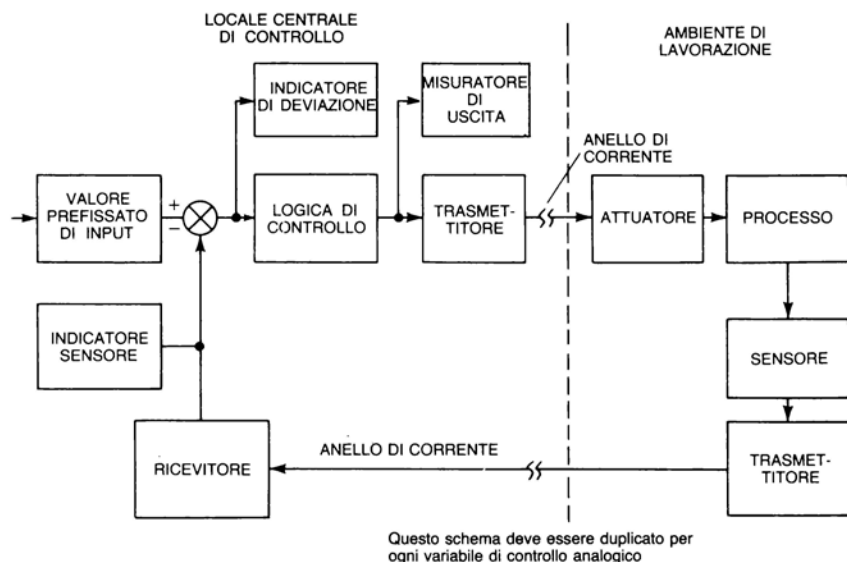



Figura 6-10. Schema a blocchi di un sistema centrale analogico

trasmissione seriale di dati digitali. In questa configurazione il controllo di processo locale viene effettuato da elementi di controllo analogici, e un sistema di controllo centrale e calcolatore digitale consente di immettere da un unico posto i valori prefissati per ciascun controllore. Ciascun controllore è interfacciato attraverso un collegamento di trasmissione digitale. Uno schema a blocchi di questo tipo di sistema è rappresentato in *Figura 6-11*.

Questo sistema consente l'effettuazione di complessi calcoli o la risoluzione di complessi algoritmi. I risultati sono cambiamenti nei valori prefissati per i diversi elaboratori locali. Ciò è particolarmente utile quando vi è una notevole interazione di processo e la relazione fra le variabili non è lineare.

Controllo digitale distribuito

Il controllo digitale distribuito permette di suddividere il calcolo per ciascun compito tra vari elementi di controllo. In altri termini, invece di avere soltanto un calcolatore situato in un punto di controllo centrale che effettua tutti i calcoli, ciascun controllore di anello locale ha la possibilità di effettuare calcoli digitali. In *Figura 6-12* è mostrato uno schema a blocchi di un sistema di controllo distribuito che consente di controllare sia punti vicini che punti lontani. Questo sistema consente anche di variare i valori prefissati e di porre

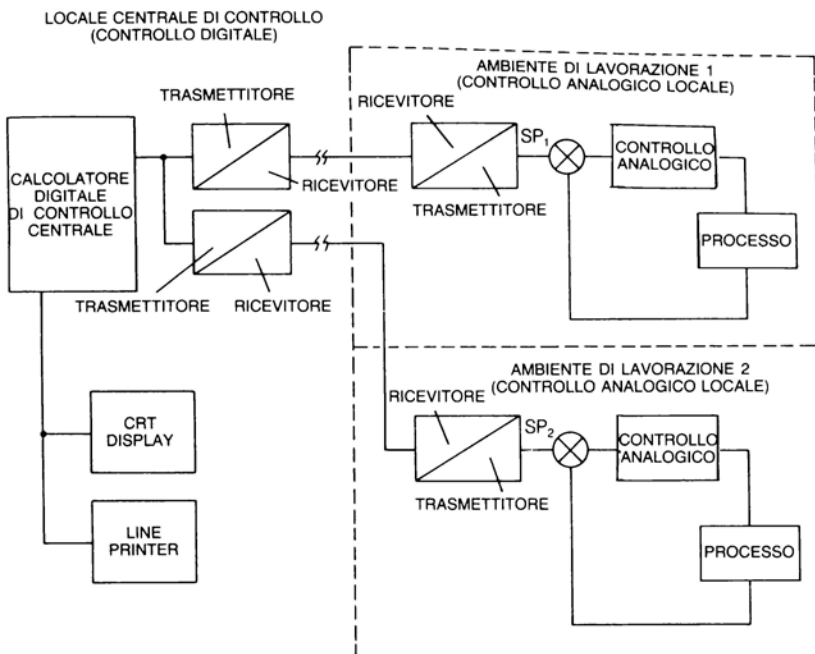



Figura 6-11. Schema a blocchi di controllo ibrido

in cascata differenti anelli di controllo locale facendo passare l'informazione attraverso il calcolatore centrale. Tutte le informazioni di anello locale possono essere inviate al calcolatore centrale di controllo in modo da poter essere facilmente controllate dall'operatore. Al tempo stesso, ciascun singolo anello di controllo opera in modo indipendente dagli altri, cosicché qualsiasi problema di comunicazione o sovraccarico del calcolatore centrale non influenza l'operazione di alcun ciclo di controllo di processo in tempo reale; gli unici effetti sarebbero l'incapacità di verificare gli anelli, di passare informazioni da un anello ad un altro, o di variare i valori prefissati dal posto centrale di controllo.

Ciascun calcolatore digitale risolve le equazioni di controllo per il suo anello locale mediante un controllo a software, e alcuni sensori analogici e attuatori analogici sono interfacciati con il sistema mediante dei convertitori di tipo analogico/digitale e digitale/analogico. Spesso è possibile aggiungere altre funzioni logiche e dei nuovi controlli semplicemente riprogrammando uno o più calcolatori digitali. I controllori di tipo digitale rappresentano l'attuale tendenza nella progettazione di sistemi di controllo continuo.

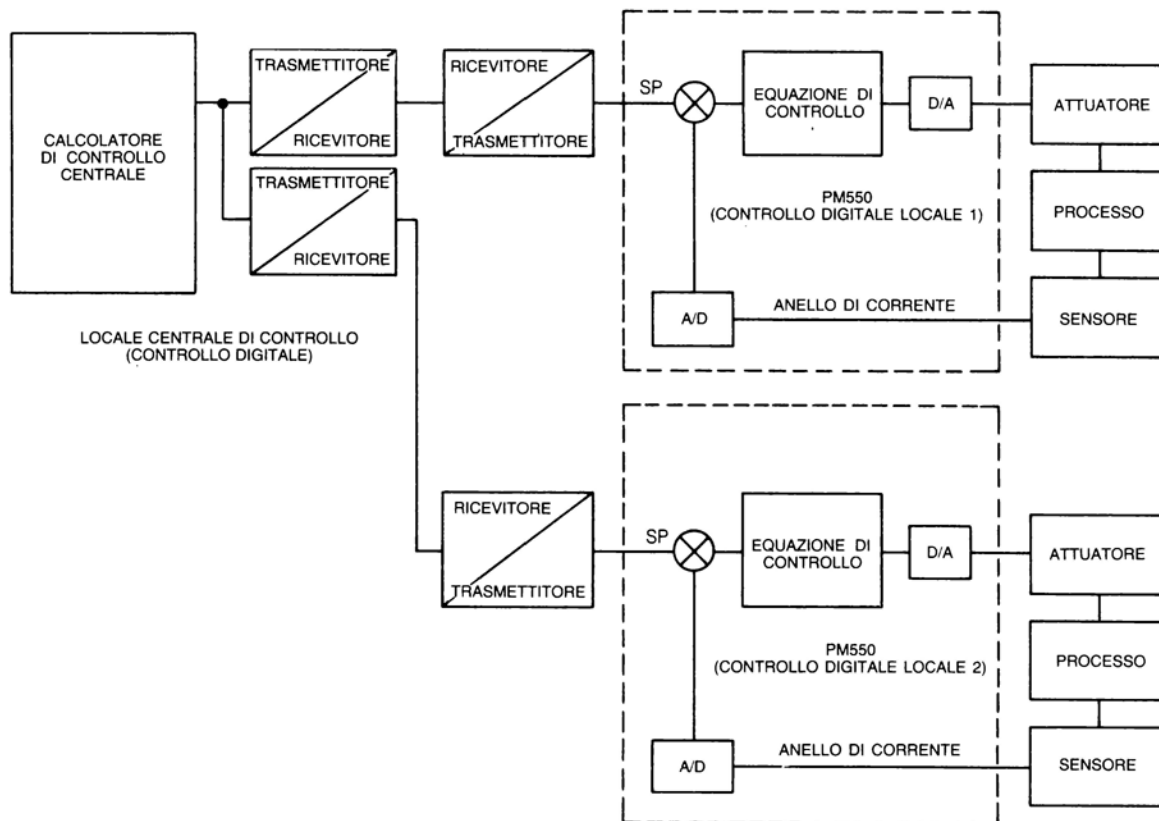



Figura 6-12. Schema a blocchi di un sistema di controllo digitale distribuito

ESEMPI DI SISTEMI DI CONTROLLO CONTINUO

Esiste un certo numero di metodi per progettare un sistema ad anello di controllo continuo. Due tipi di sistemi che possono effettuare un controllo di processo continuo sono: (1) i sistemi a microcalcolatore e (2) i controllori di processo dedicati. Esempi applicativi di ciascun tipo sono forniti nei seguenti paragrafi.

CONTROLLORI A MICROCALCOLATORE

Qui di seguito viene fornito un esempio d'impiego di un sistema che usa un microcalcolatore di tipo standard per risolvere problemi di controllo continuo. L'esempio riguarda una regolazione di temperatura e fa uso di un controllore con microcalcolatore Texas Instruments TM990 per mantenere la desiderata temperatura dell'aria per tutto l'anno in una zona di fabbricazione e in vari uffici adiacenti. Uno svantaggio inerente all'uso di un sistema a microcalcolatore di questo tipo è che il software (il programma di controllo continuo) deve essere sviluppato dall'utente senza tutte le facilitazioni che derivano dall'impiego di un controllore programmabile, ma presto vi potrà essere un software standard per risolvere problemi di controllo di processo con un microcalcolatore e la programmazione sarà molto facilitata. Naturalmente, una volta che il software è sviluppato, le modifiche per adattarlo a nuove applicazioni risultano molto più facili. L'uso di un linguaggio di alto livello opportunamente scelto permetterebbe l'impiego di questo software con differenti tipi di processori con adattamenti di modesta entità.

ESEMPIO DI CONTROLLO DI TEMPERATURA DI UN'AREA

Descrizione del sistema

In *Figura 6-13* viene mostrata la disposizione degli impianti. Vi è un'ampia zona dedicata alla fabbricazione con uffici adiacenti, e la temperatura dell'aria immessa nella zona di fabbricazione deve essere costantemente mantenuta a 68° ± 1° Fahrenheit (20 ± 0,5°C) mentre gli uffici sono mantenuti alla temperatura di 68°F o al di sopra di essa in base alla regolazione dei singoli termostati posti negli uffici.
La parte di controllo continuo del sistema è responsabile di mantenere a 68° ± 1°F la temperatura dell'aria all'uscita del condotto di immissione nella zona di fabbricazione. Gli input che i sensori forniscono al sistema sono input di temperatura nel condotto di immissione dopo il riscaldatore, T_H, e all'uscita dell'aria dopo l'unità di raffreddamento, T_C. Gli output del sistema azionano le valvole di controllo per la serpentina di riscaldamento ad acqua calda e per la serpentina di raffreddamento ad acqua raffreddata. Tutti questi input e output sono continuamente variabili nel campo di interesse.
I singoli uffici vengono controllati usando il metodo a ciclo limite. Dei riscaldatori a resistenza elettrica sono situati all'entrata del condotto di ciascun ufficio, cosicché i singoli uffici possono essere mantenuti ad una temperatura superiore a quella di 68°F del condotto dell'aria. L'illuminazione elettrica di ciascun ufficio viene controllata per determinare se l'ufficio è occupato; se l'illuminazione è accesa, l'impostazione del termostato è mantenuta, mentre in caso contrario il riscaldatore viene spento per risparmiare energia.

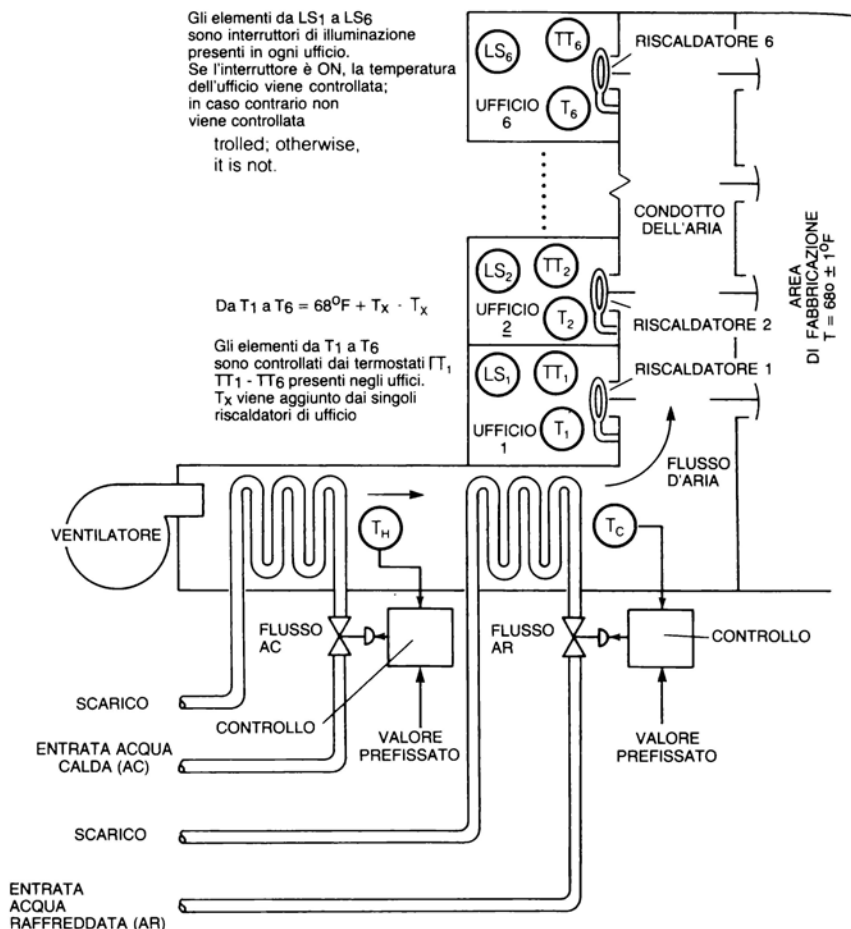



Figura 6-13. Disposizione di controllo di temperatura

Hardware del controllore

Per ogni uscita di sensore di temperatura (T_H, T_C, e da T_1 a T_6) e per ogni interruttore di illuminazione vi è un particolare input nel calcolatore ed è assegnato un particolare indirizzo di input/output per il controllore. Gli indirizzi degli output per il controllore delle valvole di flusso e dei riscaldatori sono assegnati nello stesso modo. Gli input e gli output possono essere suddivisi in segnali digitali e analogici come segue:

Input	Output
14 Analogici: Temperature delle stanze (6) Temperatura della serpentina di riscaldamento (1) Temperatura della serpentina di raffreddamento (1) Termostati delle stanze (6)	2 Analogici: Flusso di acqua calda (1) Flusso di acqua raffreddata (1)
6 Digitali: Interruttori di illuminazione (6)	6 Digitali: Riscaldatori delle stanze (6)

La linea di prodotti TM990 ha dei pannelli circuitali premontati che possono essere impiegati per soddisfare questi requisiti di input/output. L'uso di pannelli premontati consente di installare e porre in funzione il sistema molto rapidamente, poiché è già stata fatta tutta la progettazione della struttura di dettaglio. La configurazione di sistema in *Figura 6-14* mostra che per questa applicazione sono necessari tre pannelli. Essi sono il TM990-101 CPU, che ha un interprete BASIC in una ROM presente sul pannello, due porte seriali e sino a 16K di memoria; una memoria TM990-305, un espansore di input/output per memoria addizionale e un cavo di connessione per ricevere input e attivare output per i moduli 5MT; e un pannello analogico TM990-1241R con sedici input analogici e due output analogici. Questo pannello contiene convertitori di tipo analogico/digitale per le conversioni degli input analogici, e convertitori di tipo digitale/analogico per le conversioni di output digitali. Sono inoltre necessari moduli addizionali di input/output di tipo industriale 5MT, un supporto per pannelli, un alimentatore e possibilmente uno schermo a raggi catodici. I moduli 5MT accettano input in corrente alternata e forniscono al calcolatore segnali con livelli logici standard in corrente continua, oppure ricevono dal calcolatore livelli logici standard in corrente continua e forniscono un controllo industriale in corrente alternata (da 115 a 230 V).
Il software può essere sviluppato su un sistema esterno o direttamente su questo sistema mediante l'aggiunta di: uno schermo a raggi catodici, un software di controllo di monitor per facilitare l'accettazione dei comandi di programmazione, dei mezzi per immagazzinare il programma durante lo sviluppo, e un programmatore a EPROM per immettere il software di controllo del sistema in ROM (firmware) in modo che esso possa essere inserito nel microcalcolatore.

Software per il controllore

Il software per far operare questo sistema di controllo è scritto completamente dall'utente in linguaggio ad alto livello BASIC usando il POWER BASIC® disponibile con i prodotti TM990. Il programma del sistema per questa applicazione è diviso in due parti separate: una per l'anello di processo continuo che serve per controllare la temperatura dell'area di fabbricazione e una per il controllo a ciclo limite per controllare la temperatura dei singoli uffici. Lo scopo primario è di mantenere l'aria del condotto alla temperatura prescritta per la zona di fabbricazione, e quindi condizionare ulteriormente l'aria per gli uffici. Se la temperatura in un ufficio è al di sotto della regolazione del termostato, verrà aggiunto calore fino a quando tale regolazione è raggiunta; ciò avviene inserendo il riscaldatore di quel particolare ufficio.

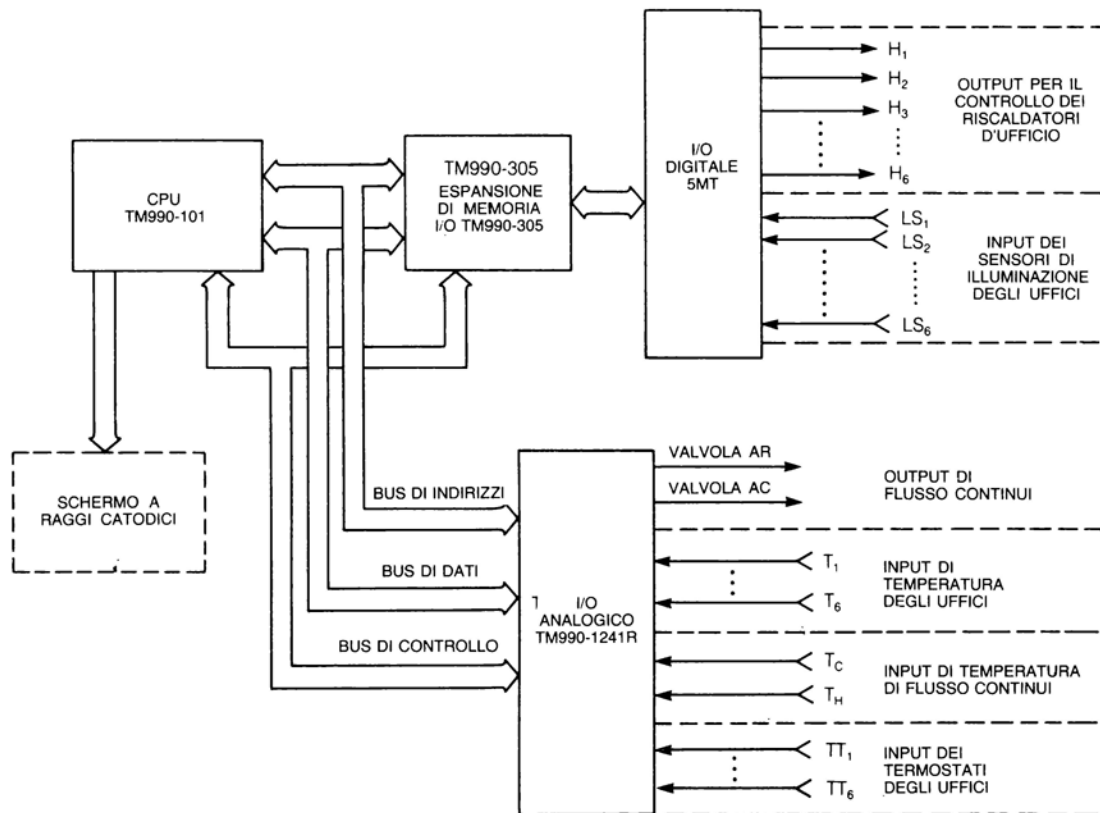



Figura 6-14. Configurazione del sistema di controllo

Il software è predisposto in modo da rilevare periodicamente i segnali degli appropriati sensori con un ritmo molto maggiore di quello in cui possono avvenire dei cambiamenti significativi nell'input o nell'output. I sensori degli uffici sono scansionati ogni dieci secondi, e ogni scansione richiede un tempo di CPU minore di 500 millisecondi, cosicché questa operazione non richiede una quantità significativa di tempo di elaborazione. Anche i sensori del processo continuo per il controllo della temperatura del condotto dell'aria sono scansionati con un ritmo predefinito; questo ritmo, tuttavia, influenzerà il funzionamento dell'anello. L'anello del processo continuo è l'anello primario e ha priorità sull'anello secondario degli uffici, ma in questa applicazione ciò non rappresenta un grosso problema, poiché il microcalcolatore è disponibile per la maggior parte del tempo.

Software di conversione input/output

I sensori di temperatura forniscono segnali di input variabili da 4 a 20 mA sul loro campo lineare fra 32° e 96°F (0° e 35,6°C), dove la temperatura di 32°F determina nell'anello una corrente di 4 mA e la temperatura di 96°F determina una corrente di 20 mA. Per convertire il flusso di corrente in tensione entro il campo operativo di input, viene posto un resistore all'ingresso del pannello di conversione analogico/digitale TM990-1241R. Poiché gli ingressi del pannello sono previsti per funzionare sul campo da 0 a 10 V, è stato scelto un resistore da 500 ohm in modo da convertire il segnale di 4 mA in 2 V, e il segnale di 20 mA in 10 V. Il fattore di conversione di input (FC) è pertanto:

$$FC = (96 - 32)/(10 - 2)$$
$$= 64/8$$
$$= 8°F/V$$

La conversione e la normalizzazione dell'input V1 possono essere controllate con la seguente linea di codice POWER BASIC:

```
LET T1 = (V1 - 2)*8 + 32
```

Tutti gli altri input possono essere convertiti in modo simile. Per esempio, se il campo lineare dei singoli termostati di ufficio viene scelto fra 79° e 86°F (21,1° e 30°C) la conversione e la normalizzazione sono:

$$FC = (86 - 70)/(10 - 2)$$
$$= 16/8$$
$$= 2°F/V$$

e il codice in POWER BASIC per l'input V11 è:

```
LET S1 = (V11 - 2)*2 + 70
```

Gli output analogici consistono di due anelli di corrente presenti sui pannelli 1241. Questi input azionano attuatori a valvola di tipo asservito che sono completamente aperti a 4 mA e completamente chiusi a 20 mA; nei pannelli 1241 questo corrisponde a un numero fra 0 e 4095. In altri termini, il calcolatore emette il codice binario di un

numero compreso fra 0 e 4095 che rappresenta la regolazione di controllo di una valvola da tutto aperto a tutto chiuso, e il convertitore digitale/analogico sul pannello 1241 converte il codice in una corrente compresa fra 4 mA e 20 mA per azionare la valvola.

Software di controllo degli uffici

Gli input e gli output digitali sono usati per controllare i riscaldatori degli uffici. Se i sensori rilevano la presenza di una tensione ai capi delle lampade, si presume che l'ufficio sia occupato. Gli input diretti in corrente alternata per i pannelli del calcolatore sono limitati a 30 V e pertanto, supponendo che la corrente alternata di linea sia a 115 V, viene usato un modulo di input 5MT per rilevare la tensione ai capi delle lampade. L'output del sistema controlla il corrispondente riscaldatore dell'ufficio; anche gli output sono collegati tramite un modulo di output 5MT, che fornisce un isolamento elettrico mediante accoppiamento ottico ed è capace di controllare una tensione alternata da 115 V per inserire e disinserire il riscaldatore.
Il diagramma di flusso del software per il controllo degli uffici è rappresentato in *Figura 6-15*. Il funzionamento consiste nel rilevare la temperatura prefissata e nel confrontarla con il valore medio della temperatura del particolare ufficio; viene poi fatta una media fra l'ultima misurazione e le tre precedenti per ridurre l'effetto di qualsiasi disturbo nella misurazione e per limitare inutili commutazioni ON/OFF dei controlli di potenza del riscaldatore. Questa temperatura media viene confrontata con il valore prefissato ± 1,5°F (che fornisce una banda morta di 3°F corrispondente a 1,7°C) per determinare se il riscaldatore deve essere inserito o disinserito. Se la temperatura è inferiore di 1,5°F (circa 0,8°C) rispetto al valore prefissato, in quell'ufficio viene inserito il riscaldatore (o viene lasciato inserito, se lo era già). Se il riscaldatore è inserito e la temperatura dell'ufficio è superiore di 1,5°F al valore prefissato, il riscaldatore viene disinserito. Questo ciclo viene ripetuto per ciascun ufficio fino a quando tutti gli uffici sono stati vagliati; a questo punto il programma riparte.
Si può facilmente prevedere dell'altro software per limitare la massima temperatura prefissabile, o per fornire un controllo mediante orologio delle ore in cui i riscaldatori possono essere inseriti anziché rilevare se le stanze sono occupate. Questi semplici compiti addizionali non occuperanno in modo significativo il calcolatore, né gli impediranno di effettuare la sua funzione primaria che consiste nel controllare la temperatura dell'aria nel condotto.

Software di controllo dell'area di fabbricazione

Il funzionamento del processo di controllo della temperatura dell'aria del condotto è tale che di norma saranno richiesti sia un riscaldamento che un raffreddamento. La procedura consiste dapprima nello scaldare l'aria con la serpentina di riscaldamento sino ad una temperatura leggermente superiore a quella desiderata, e quindi nel raffreddare l'aria ala temperatura desiderata. Ciò comporterà sempre un certo raffreddamento e manterrà la valvola di raffreddamento nella sua regione lineare di funzionamento, per fornire un miglior controllo.
Il diagramma di flusso del software di questo ciclo di controllo è mostrato in *Figura 6-16*. Il software per l'anello è molto semplice: rileva la temperatura di ingresso dell'aria e aggiunge calore se è inferiore a 69°F; rileva poi la temperatura del condotto di uscita

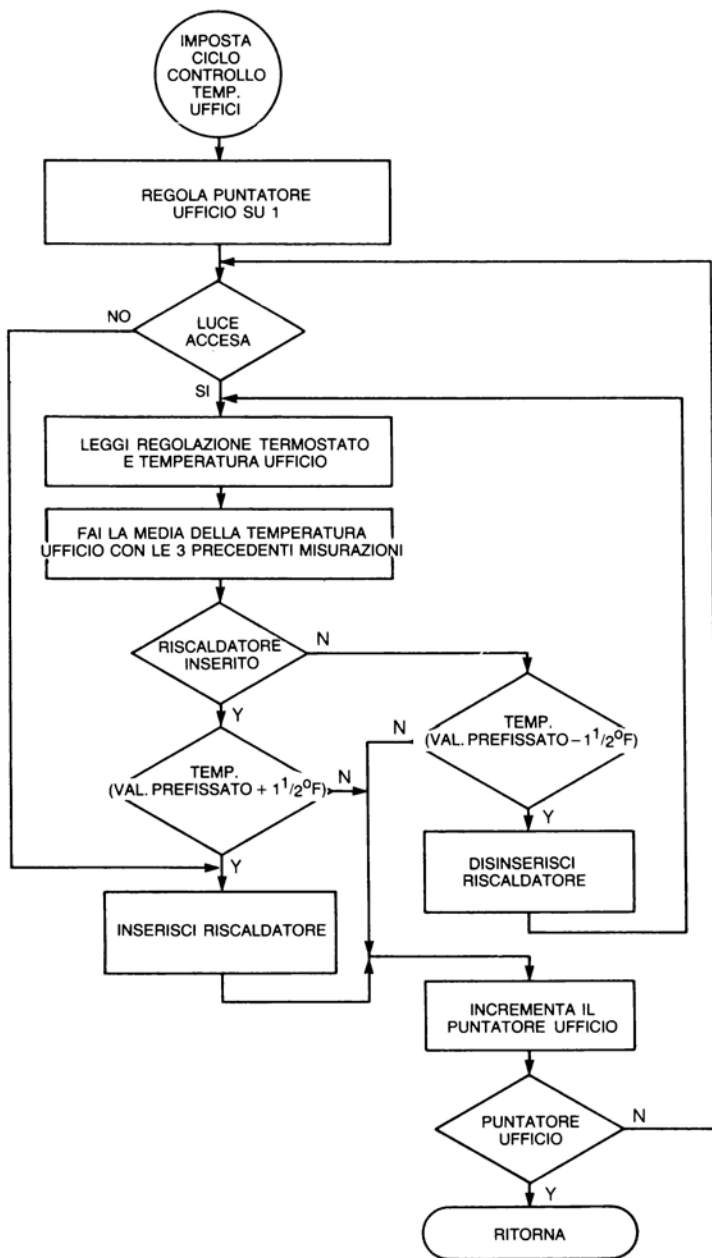



Figura 6-15. Diagramma di flusso del software di controllo della temperatura degli uffici

e la raffredda se è al di sopra di 68°F. Il controllo risultante, tuttavia, è relativamente sofisticato. Per calcolare il valore di output per il controllo della valvola viene usata la seguente equazione di controllo integrato-proporzionale:

$$CLT = H(0) + K_p e + K_p \frac{1}{t_i} \int_0^t e dt$$

dove: e = errore
K_p = costante di guadagno proporzionale
T_i = tempo di integrazione (velocità di ripristino)

K_p viene modificato immettendo nel sistema i parametri iniziali basati sui parametri fisici del sistema stesso. Il guadagno integrale $K_p(1/T_i)$ è una funzione di K_p e controlla la velocità con la quale la porzione integrale dell'equazione viene aggiornata. Quanto minore è il tempo, tanto maggiore sarà l'effetto della porzione integrale.
Nell'equazione

$$CTL = K_p{}^*e + (I - (K_p/T_i)^*e)$$

mostrata in *Figura 6-16*, l'effettiva integrazione sul tempo T_i è $(K_p/T_i)^*e$. Questo valore influenza l'ultimo valore di I sommandolo al valore $(K_p/T_i)^*e$. Il nuovo valore di I viene quindi aggiornato nella sua posizione di memoria, in modo da poter essere usato per I nel successivo tempo di integrazione T_i.
Il valore totale di integrazione I viene mantenuto costante nell'equazione di controllo quando la variabile controllata CTL è 0 o al 100% (1, in questo caso); questi punti estremi sono chiamati "in saturazione". Quando CTL è uguale a 0, il termine I viene bloccato a 0 sino a quando CTL esce di saturazione e ritorna nel suo campo lineare; analogamente, quando CTL è 1, il termine I viene bloccato ad 1 sino a quando CTL esce di saturazione e ritorna nel suo campo lineare. Se gli errori fossero semplicemente sommati fra loro in continuazione, alcune condizioni (come l'avviamento) potrebbero far restare l'algoritmo in saturazione per lungo tempo dopo che è stato raggiunto il valore prefissato, e ciò richiederebbe un tempo molto maggiore per la stabilizzazione del sistema.
Dopo aver regolato la variabile di controllo del riscaldamento, il software continua nello stesso tipo di sequenza per regolare la variabile di controllo del raffreddamento. Ognuna delle valvole ha un anello di controllo; l'anello della valvola dell'acqua calda agisce come controllo grossolano e quello della valvola dell'acqua raffreddata agisce come controllo fine. Il controllo della valvola dell'acqua raffreddata, pertanto, può avere un guadagno superiore a quello del controllo della valvola dell'acqua calda. Il ritmo di campionatura per ogni anello è programmabile, e così pure il guadagno proporzionale, cosicché entrambe le risposte proporzionale e integrata possono essere ottimizzate durante il funzionamento.
La stessa procedura potrebbe essere impiegata per aggiungere la risposta derivata, tuttavia in questa applicazione la risposta derivata non influenzerebbe in modo significativo le prestazioni del sistema, e la quantità di tempo richiesta per determinare i coefficienti di guadagno non sarebbe giustificata.
Le istruzioni in POWER BASIC (e le relative spiegazioni) per realizzare l'anello sono

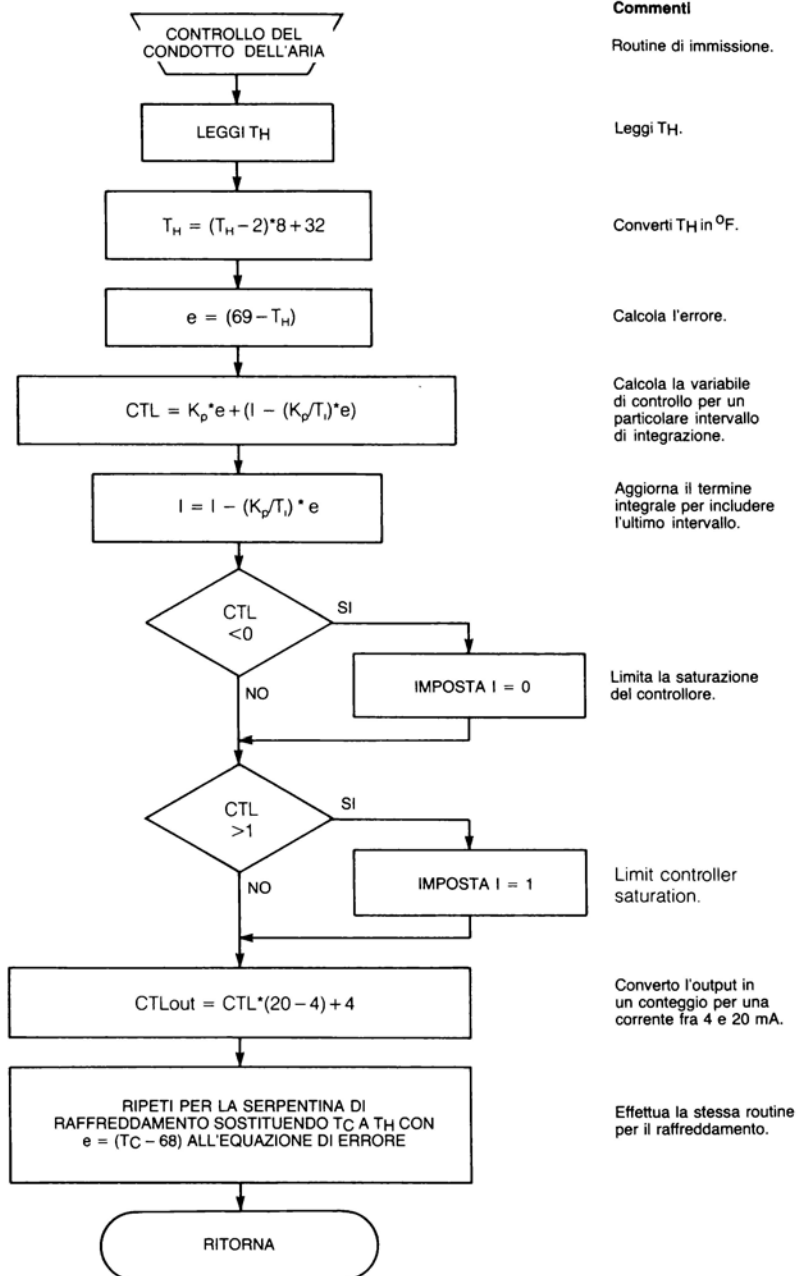



Figura 6-16. Anello di controllo a software per controllo continuo

riportate in *Figura 6-17*. Queste istruzioni sono incorporate in un anello di controllo più ampio che mantiene l'intera sequenza di funzionamento del software del sistema. In realtà, le entità dei ritardi di tempo dovrebbero essere scritte come una variabile, con un'altra porzione di software che fornisce al tecnico di controllo la possibilità di modificare le entità di ritardo di tempo mediante una tastiera o in altro modo.

		Commenti
10	TH = INP(100)	Rileva la temperatura dell'aria alla serpentina di riscaldamento e immagazzinala in T_H.
20	TH = (TH − 2)*8 + 32	Converti il valore T_H da tensione in °F. ʼoltage.
30	E = 69 − TH	Calcola l'errore in °F.
40	CT = KP*E + (I − (KP/TI)*E)	Calcola il nuovo valore del punto di controllo.
50	I = I − (KP/TI)*E	
60	IF CT < 0 THEN I = 0 ELSE GOTO 70	Previeni la saturazione del controllore.
70	IF CT > 1 THEN I = 1 ELSE GOTO 80	Prevent controller windup.
80	CT = CT*(20 − 4) + 4	Converti il valore di output nella corrispondente corrente di anello 4-20 mA.
90	OUT 120, CT	Output the computed value setting to the heat control valve.

Si usa un'analoga routine per la serpentina di raffreddamento, sostituendo tuttavia T_C a T_H e $E = T_C - 68$ all'errore nella fase 30. Naturalmente le costanti di guadagno nei due anelli possono essere differenti e dovrebbero ricevere nomi differenti.

Figura 6-17. Programma in BASIC per il diagramma di flusso di Figura 6-16

CONTROLLORE DI PROCESSO DEDICATO

Un esempio di controllore di processo dedicato è il controllore programmabile PM550 prodotto dalla Texas Instruments. Anche i processi continui solitamente richiedono alcuni controlli di tipo discreto, e questo controllore è in grado di effettuare simultaneamente sia controlli continui sia controlli con logica a scala del tipo per relè. Usando un sistema di controllo analogico, sarebbero stati necessari due controllori separati.
La *Figura 6-18* mostra l'hardware del sistema PM550 e la *Figura 6-19* mostra un tipico schema a blocchi del sistema. Il sistema consiste di un'unità di controllo centrale, di un alimentatore, di moduli di input/output analogici e digitali, di un temporizzatore/contatore, di un modulo di accesso all'anello per i rilevamenti, di un simulatore di input/output e di un'unità di programmazione. Quest'ultima viene usata soltanto per programmare inizialmente il sistema o per modificare il programma esistente una volta che il sistema è in azione. L'unità può accettare sino a 512 punti discreti di input o output, sino a 8 funzioni di temporizzatore/contatore e sino a 8 anelli PID; si possono aggiungere tutte le unità di input/output necessarie, fino al limite massimo indicato. Il modulo di accesso all'anello consente all'operatore di richiedere al sistema di visualizzare uno qualsiasi dei parametri richiesti e di modificare questi parametri.
Il PM550 viene usato in molti sistemi di controllo industriale, dai laminatoi di acciaio agli impianti chimici e al trattamento di cibi. Un'applicazione è la tostatura dei chicchi di caffè analizzata nel Capitolo 2. Sebbene questo sia un tipo di processo molto vecchio, un certo numero di fattori recentemente ha reso più stringenti le necessità di controllo, e il PM550 è l'ideale per migliorare il controllo.

Figura 6-18. Sistema di controllo programmabile PM550

ESEMPIO DI TOSTATURA DI CAFFÈ

Massima efficienza energetica

La maggior parte degli impianti di tostatura del caffè impiega sistemi di riscaldamento a gas. Fino al 1973 era disponibile a prezzi ragionevoli del gas combustibile con potere calorico sostanzialmente costante. Al giorno d'oggi la qualità del gas disponibile non è così costante, e il costo è tremendamente aumentato. Pertanto attualmente è molto più importante che in passato ottenere il massimo sfruttamento calorico dal gas, e da ciò deriva la necessità di un migliore controllo del rapporto gas/aria nel processo di combustione.

Riduzione del tempo di trattamento e dello spreco di materiale grezzo

Il tempo di trattamento influenza sia la quantità di energia richiesta sia il dimensionamento dell'impianto necessario per la lavorazione del prodotto. Infatti, quanto più lungo è il tempo di trattamento, tanto più grande dovrà essere l'impianto per fornire la stessa quantità di prodotto in uscita. Inoltre, se un minor controllo può ridurre il tempo di lavorazione, il costo di produzione diminuirà.
Al giorno d'oggi il costo del caffè è considerevolmente più elevato che in passato e pertanto qualsiasi errore di trattamento che possa danneggiare la qualità o dar luogo a

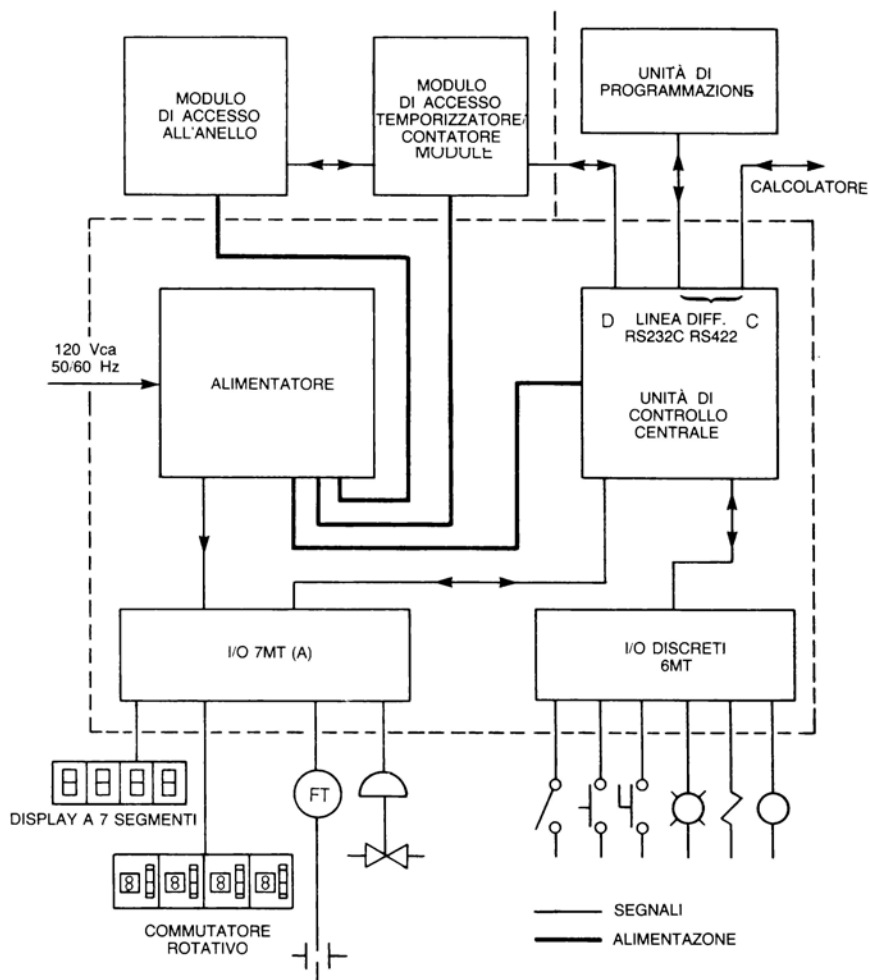



Figura 6-19. Tipico schema a blocchi del sistema PM550

sprechi è più costoso. In questa applicazione gli sprechi e il tempo di lavorazione sono strettamente correlati fra loro. Quanto più elevata è la temperatura del trattamento, tanto minore è il suo tempo e il costo dell'energia necessaria; tuttavia, se la temperatura è troppo elevata i chicchi di caffè vengono rovinati ed aumenta la quantità di materiale sprecato. Per ridurre il tempo di trattamento pur mantenendo una ridotta quantità di scarti, la temperatura deve essere controllata entro stretti margini.

Anello di controllo dell'erogazione di carburante

Lo scopo principale del controllore PM550 è di mantenere la temperatura di tostatura dei chicchi al corretto valore, e questo scopo viene raggiunto controllando il flusso di carburante e di aria al bruciatore. La temperatura dei chicchi viene usata per riportare il sistema al valore prefissato, regolando l'anello di controllo del flusso di combustibile. Questo anello deve mantenere la temperatura a un valore quanto più vicino possibile a quello ottimale di tostatura, pur assicurando che il limite massimo di temperatura non venga superato. La *Figura 6-20* illustra uno schema a blocchi del sistema di controllo necessario per controllare questo processo.

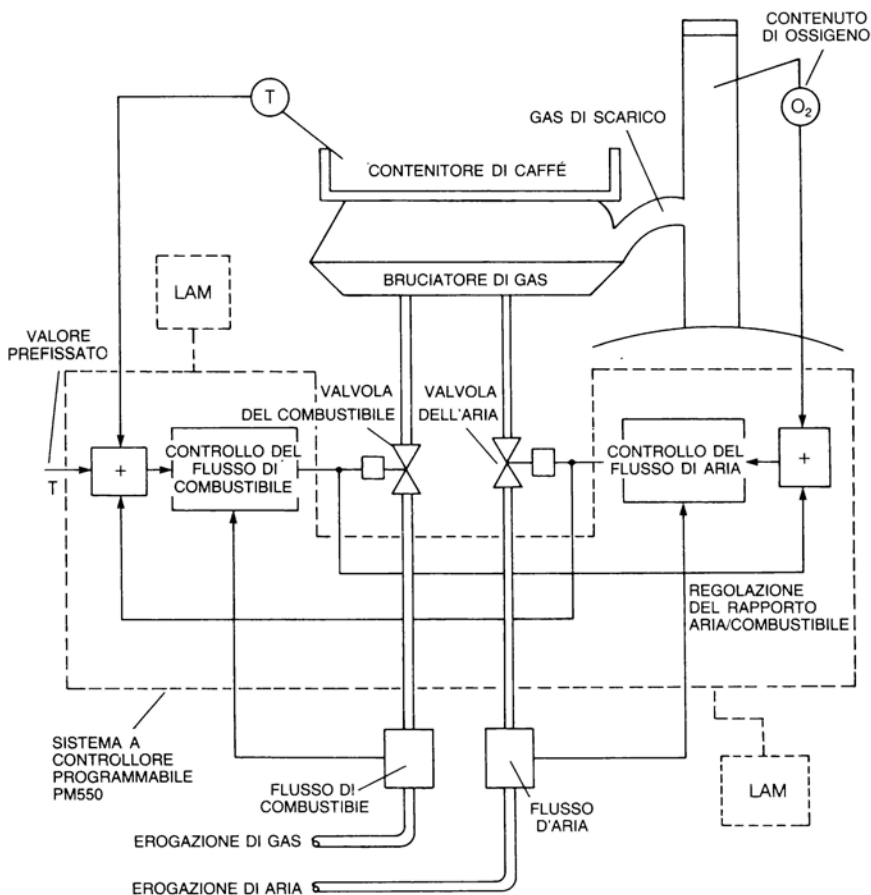



Figura 6-20. Schema di controllo per la torrefazione di caffé

Miscela aria/carburante

Il controllo del processo deve incorporare anche degli anelli di controllo addizionali per assicurare che venga mantenuta la massima efficienza di combustione del gas e che si verifichino le minime perdite di materiale. Quando aumenta la richiesta di calore è essenziale che il carburante è l'aria vengano aumentati simultaneamente, allo scopo di mantenere il rapporto aria/carburante entro limiti di sicurezza per prevenire inefficienza di combustione, spegnimento di fiamma o, nel caso estremo, un'esplosione. Queste possibilità dipendono dalle differenze nella dinamica del sistema per il controllo del flusso d'aria e in quello per il controllo del flusso di carburante. Come risultato è necessaria una limitazione reciproca carburante/aria per assicurare in ogni caso un certo eccesso di aria.

Controllo del flusso d'aria e di carburante

La *Figura 6-21* rappresenta uno schema di controllo semplificato con in alto i sensori di input, in basso gli output di controllo e nella parte intermedia gli anelli di controllo che interagiscono tra loro. Un notevole pregio del controllore programmabile PM550 è che esso può gestire anelli interattivi di questo tipo con degli input di sola programmazione.
Il valore prefissato del flusso di carburante per il controllore PI in C di *Figura 6-21* deriva dal minore dei segnali 1 o 2 in A. 1 è la richiesta dell'input relativo alla temperatura dei chicchi, e 2 è l'input che fa sì che il carburante sia limitato dalla quantità di aria disponibile.
Il valore prefissato del flusso d'aria per il controllore PI in D dipende dal maggiore dei segnali 1 o 2 in B. Anche in questo caso 1 è la richiesta dell'input di temperatura dei chicchi, e 3 è l'input di limitazione che fa sì che la quantità d'aria venga regolata in funzione della quantità di carburante disponibile. Questa disposizione assicura che il flusso di carburante diminuisca prima del flusso d'aria, e che il flusso d'aria aumenti prima del flusso di carburante. Gli anelli confrontano i valori di regolazione con i flussi reali e, usando nel controllore l'algoritmo PI, viene calcolato il corretto output dell'attuatore.

Correzione flusso d'aria/ossigeno

Poiché la qualità del gas non è costante, un semplice rapporto di flusso non è sufficiente per assicurare la massima efficienza di combustione. Pertanto viene misurato il contenuto di ossigeno nel gas di scarico per fornire un input relativo all'efficienza del processo di combustione, in modo che il sistema di controllo possa compensare le variazioni del contenuto calorico del combustibile. Questo anello di regolazione fornisce un input all'anello di controllo del flusso d'aria per controllare il rapporto di flusso tra aria e combustibile.

Preparazione dell'anello

Un sistema a controllore programmabile come il PM550 dà un vantaggio concreto, e la stessa struttura di diagramma di flusso mostrata in *Figura 6-16* per un anello PI può

Figura 6-21. Controllo di combustione con correzione di ossigeno

Tabella 6-1. Foglio di specifiche di anello

Loop Description: Gas Flow PM550 Loop Number 2

MEMORY ALLOCATION

Tuning Constants in V (C or V)

	Beginning Address	Table Length Tune in C	Table Length Tune in V	Ending Address
Constant Table	C200			C214
Variable Table	V200			V217

Are loop flags for alarms and mode switching allocated in the image register? Yes

If yes, give beginning address: CR201
(10 successive locations will be used)

PROCESS VARIABLE

Address: V57 (A103)

20% Offset: Yes

Square root? Yes (V202)

Special calculation? No

If yes, give address: —

Low Range = 0

High Range = 1000 SCFH

Engr. Units SCFH

Transmitter FT-102

CONTROL CALCULATIONS

Sample Time = 0.5 sec.

Remote Set Point? Yes

If yes, give address: V218

Special Calculation? No

If yes, give address: —

Lock — Set Point? —

Auto/Manual? — Cascade? —

Error Squared? —

Error Deadband? —

Gain = 10

Reset Time = 999.

Rate = 0

Reverse Acting? No

Output Address: V219

20% Offset? Yes

ALARMS

Process Variable	Low = 200	High = 800
Deviation	Yellow = 100	Orange = 200

essere impostata per ognuno degli anelli PI presenti in *Figura 6-21*.
Se viene usato un sistema a microcalcolatore, dovrà essere scritto un sottoprogramma per ciascuno degli anelli, mentre nel PM550 gli anelli PID sono già previsti. L'unico requisito è che i parametri di guadagno, i tempi di integrazione (velocità di ripristino) e i tempi differenziali (velocità di controllo) vengano programmati nel sistema assieme agli indirizzi dove possono essere trovate le costanti e le variabili, unitamente alle indicazioni relative agli output, al tipo di calcoli da effettuare, e alle unità o fattori di conversione che devono essere usati nel sistema.
Il sistema non soltanto regola gli anelli in base alle informazioni, ma pone anche domande al programmatore, in modo che le corrette informazioni vengano immesse nella corretta sequenza. Ciò consente al tecnico di controllo di concentrarsi sul processo anziché sulla programmazione. La *Tabella 6-1* è un foglio di specifiche di anello, che fornisce una documentazione dei parametri significativi del sistema e aiuta a semplificare l'immissione dei dati da parte del programmatore. Il foglio è suddiviso in quattro aree: tabella di memoria dell'anello (memory allocation), specifiche delle variabili del processo (process variable), specifiche dei calcoli di controllo (control calculation) e limiti di allarme (alarms). Il PM550 avverte il programmatore nello stesso ordine. Qui di seguito vengono riportati alcuni dettagli di queste aree.

Assegnazione di memoria

Ogni anello richiede sia dati variabili sia dati costanti, e l'immissione nella tabella fornisce dei puntatori in modo tale che il PM550 sappia dove guardare nella memoria per ritrovare i dati necessari. La memorizzazione dei dati viene usata per il fattore di guadagno, per i valori prefissati e per gli altri dati variabili del processo.

Variabili di processo

Il PM550 richiederà gli indirizzi di input della variabile di processo; se vi è uno scostamento residuo, e se è necessaria una radice quadrata, porrà altre domande relative alle unità e ai fattori di conversione, come riportato sul foglio di specifica.

Calcoli di controllo

Devono anzittutto essere immesse le costanti di regolazione degli anelli di controllo (guadagno proporzionale, tempo di ripristino e velocità di controllo) unitamente ai valori prefissati, agli indirizzi di output e alla polarità del guadagno. La polarità del guadagno viene determinata in base alla risposta fornita alla domanda "Reverse Acting?" (azione inversa); una risposta affermativa significa che la polarità è negativa. Sono anche possibili varie altre opzioni, che tuttavia esulano dallo scopo di questo libro.

Specifiche di allarme

Il sistema fornisce dei mezzi standard per avvertire l'operatore se una variabile del processo esce dai limiti di sicurezza specificati dall'utente. I dati per i limiti di sicurezza sono indicati nelle specifiche di allarme.

La *Tabella 6-1* riporta le specifiche per l'anello di controllo del flusso di gas identificato dal numero 2.

Le costanti sono immagazzinate in memoria nelle posizioni da C200 a C214, mentre le variabili sono immagazzinate nelle posizioni da V200 a V217. La variabile di processo ha uno scostamento residuo, è indicata in unità SCFH, ha un valore massimo di 1000, è situata in V57 e richiede il calcolo di una radice quadrata. Il guadagno per i calcoli di controllo è 10, il tempo di campionatura è 0,5 e il tempo di ripristino è 999. I punti di allarme nelle variabili di processo sono fissati a 200 e 800.

Quando queste informazioni vengono immesse attraverso le unità di programmazione mostrate in *Figura 6-18*, il sistema è pronto per funzionare, a condizione che tutti i collegamenti elettrici corrispondenti a quelli in *Figura 6-19* siano stati fatti correttamente. Per ottenere il corretto funzionamento del sistema finale, il guadagno e i tempi di integrazione inizialmente impostati dovranno essere regolati in modo fine.

Può essere effettuato un controllo continuo anche usando la tecnica a proporzionamento di tempo, che sarà analizzata qui di seguito.

CONTROLLO CONTINUO A PROPORZIONAMENTO DI TEMPO

Nel controllo continuo a proporzionamento di tempo viene variato il tempo in cui la quantità controllata è attiva o applicata, anziché variare l'ampiezza di tale quantità. Questo tipo di controllo è comunemente usato per i riscaldatori elettrici impiegati negli estrusori e per le applicazioni di controllo di flusso, e opera inserendo e disinserendo una pompa invece di agire su una valvola posta in una tubazione. Può essere usato in qualsiasi applicazione in cui la risposta di controllo di output è rapida al confronto del parametro che viene controllato; tuttavia è necessario un attuatore che possa operare con inserimenti e disinserimenti rapidi e frequenti.

ESEMPIO DI CONTROLLO DELLA TEMPERATURA DI UNA VASCA

Il controllo continuo a proporzionamento di tempo è molto efficace in applicazioni in cui viene usato il calore erogato da riscaldatori a resistenza elettrica. In un sistema a controllo proporzionale come quelli discussi finora, il controllo di temperatura verrebbe effettuato variando la tensione che alimenta l'elemento riscaldatore. Tuttavia, con il controllo a proporzionamento di tempo la tensione rimane costante, e il controllo è effettuato variando la quantità di tempo in cui la tensione viene applicata all'elemento riscaldatore. La tensione viene alimentata e interrotta molto rapidamente, e la media del tempo di alimentazione determina l'uscita calorica.

Come illustrato in *Figura 6-22*, l'output del sistema di controllo è un "treno" di impulsi che determina un coefficiente di utilizzazione variabile. Fra l'inizio di un impulso e l'inizio del successivo trascorre un periodo di tempo fisso T. Il ritmo di ripetizione degli impulsi si trova facendo l'inverso di T (cioè 1/T). Se durante questo periodo non viene consentito alcun output, il ciclo utile è 0 e non viene prodotto alcun calore; viceversa, se l'output viene mantenuto per tutto il periodo, il ciclo utile è 100 e viene prodotto il

massimo calore. Normalmente il ciclo utile e la quantità di calore prodotto saranno intermedi fra questi due estremi.
In questa applicazione la temperatura della vasca deve essere mantenuta a 37°C. Poiché non vi è alcuna serpentina di raffreddamento, il funzionamento è tale che se la temperatura supera i 37°C il ciclo utile è 0%, mentre a 27°C il ciclo utile è il 100%. Pertanto, il coefficiente di conversione è 100% per 10°C, ovvero 10%/°C. La determinazione del ciclo utile viene effettuata come nel controllo proporzionale standard; cioè, sono usati controlli proporzionali, integrati e derivati nella combinazione richiesta per determinare il ciclo utile per l'output per l'elemento riscaldatore.

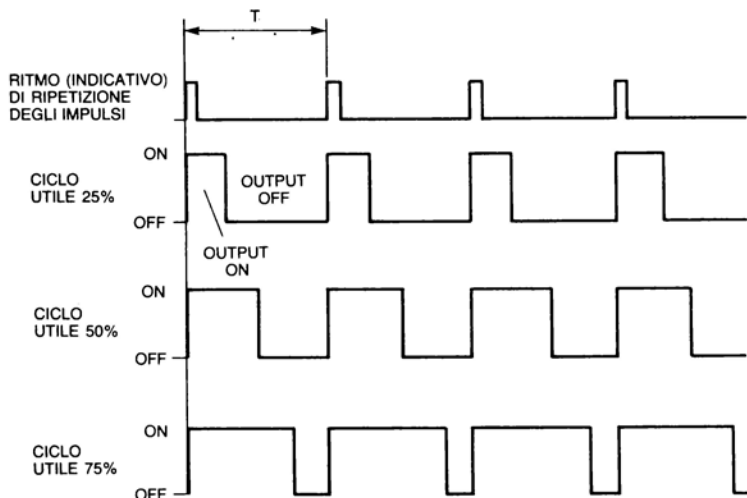



Figura 6-22. Forma di onda di output con controllo a proporzionamento di tempo

Impiego di un PM550 come controllore

In *Figura 6-23* è rappresentato un sistema di controllo a proporzionamento di tempo usante un PM550 dove un anello di controllo PID invia il suo output a un sottosistema di proporzionamento di tempo. La variabile del processo è la temperatura della vasca. L'anello PID viene formato immettendo nel sistema il guadagno, il tempo di ripristino e il tempo di campionatura. Sarà poi necessario fornire il campo delle variabili di processo (da 27 a 37) e l'unità di misura (°C) per impostare l'anello, e gli indirizzi di memoria per le costanti e le variabili.

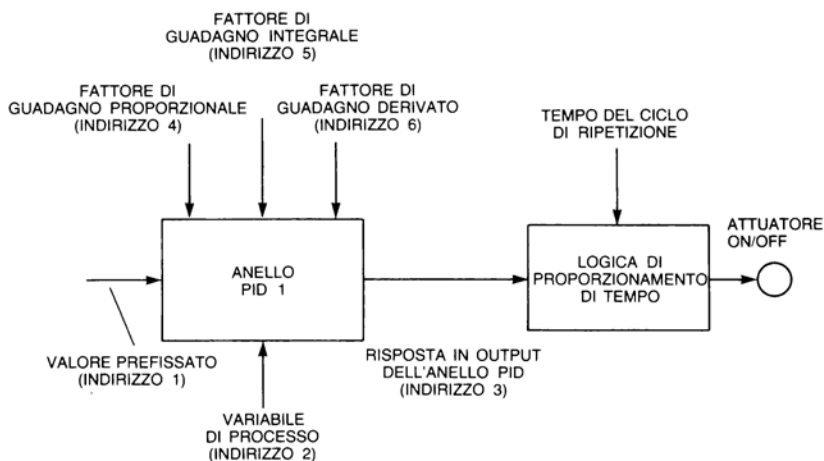



Figura 6-23. Schema a blocchi del PM550 per un controllo a proporzionamento di tempo

Il segnale di output a proporzionamento di tempo viene formato usando funzioni logiche standard a scala, due temporizzatori interni e una speciale funzione contenuta nel PM550. L'input per la funzione a proporzionamento di tempo è l'output dell'anello PID che varia fra lo 0% e il 100% (0 e 1). Uno schema del sottosistema a proporzionamento di tempo è illustrato in *Figura 6-24.*

Il primo temporizzatore è del tipo a ritardo e determina il ritmo di ripetizione (frequenza) degli impulsi. Un contatto normalmente chiuso (C1) viene usato per resettare e abilitare il temporizzatore, in modo che esso operi continuamente, e la funzione speciale usa le entrate PID per calcolare il tempo di conteggio per il secondo temporizzatore dell'anello. Il secondo contatore viene resettato e abilitato ogniqualvolta la funzione speciale completa la sua operazione, e viene abilitato ogniqualvolta il primo contatore si azzera, dato che il primo contatore viene usato per richiamare la funzione speciale che ricarica entrambi i contatori. SF8 è la speciale funzione matematica predefinita nel PM550 per svolgere l'equazione che segue la chiamata di funzione. Pertanto, l'istruzione:

$$SF8\ V120 \times C115 \div C116 = V121$$

effettua quanto segue:

Prende V120, che è l'indirizzo del risultato della risposta dell'anello PID (un numero compreso fra 0 e 1) e lo moltiplica per il conteggio del periodo di ripetizione prefissato per il temporizzatore 1 memorizzato nella posizione C115. Il prodotto dei valori V120 e C115 viene diviso per il valore presente all'indirizzo C116. Il contenuto di C116 è un fattore di conversione per assicurare un corretto piazzamento della virgola decimale nel risultato posto all'indirizzo V121. Il contenuto di V121 è il conteggio del ciclo utile, che è il dato usato per caricare il temporizzatore 2.

La programmazione avviene immettendo i valori elencati nella *Tabella 6-2* quando il sistema pone dei quesiti al programmatore, e immettendo le speciali istruzioni di funzione e di temporizzazione richieste dal diagramma a scala.
Con il controllo continuo a proporzionamento di tempo occorre tenere presente che non tutti i processi hanno un attuatore di output che può rispondere in modo sufficientemente rapido per essere azionato da impulsi. Pertanto questo tipo di controllo proporzionale ha un'applicazione più limitata del controllo proporzionale standard, ma è compatibile con un sistema digitale poiché il conteggio e la divisione di tempo sono inerentemente consoni al modo di operare di un processo digitale.

DETERMINAZIONE DELLA RISPOSTA DELL'ANELLO

Per ciascun anello di controllo occorre determinare le costanti di guadagno e il ritmo di aggiornamento e, poiché il processo usualmente non è conosciuto abbastanza per ricavare un'equazione che lo descriva, la determinazione dei fattori di guadagno solitamente viene fatta in modo sperimentale. Questi fattori devono essere specificati in modo appropriato affinché il sistema fornisca il prodotto desiderato e non abbia una risposta instabile. Per regolare l'anello di controllo esistono vari metodi, che solitamente sono

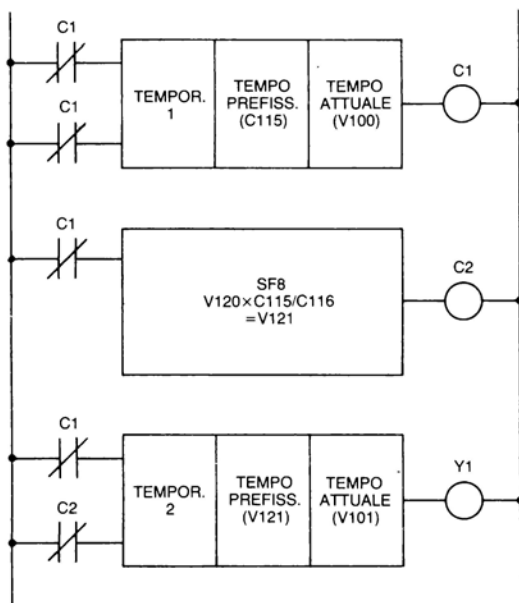



Figura 6-24. Diagramma logico a scala per controllo a proporzionamento di tempo

Tabella 6-2. Foglio di specifiche di anello

Loop Description: Hot Water Vat Temperature Control Loop PM550 Loop Number 1

MEMORY ALLOCATION

Tuning Constants in C (C or V)

	Beginning Address	Table Length Tune in C	Table Length Tune in V	Ending Address
Constant Table	C100			
Variable Table	V100			

Are loop flags for alarms and mode switching allocated in the image register? No

If yes, give beginning address: —
(10 successive locations will be used)

PROCESS VARIABLE

Address: A120

20% Offset: No

Square root? No

Special calculation? No

If yes, give address: —

Low Range = 27

High Range = 37

Engr. Units °C

Transmitter —

CONTROL CALCULATIONS

Sample Time = 10.0 sec.

Remote Set Point? No

If yes, give address: —

Special Calculation? No

If yes, give address: —

Lock-Set Point? No

Auto/Manual? Yes Cascade? No

Error Squared? No

Error Deadband? No

Gain = 10%/°C

Reset Time = 2 min.

Rate = 0.0 min.

Reverse Acting? No

Output Address: V120

20% Offset? No

ALARMS

Process Variable	Low = 75	High = 100
Deviation	Yellow = 4	Orange = 8

basati sull'osservazione della risposta del sistema rispetto al tempo, rilevata con un registratore a striscia di carta in presenza di una perturbazione immessa manualmente. Un metodo per determinare i fattori di guadagno è il seguente.

Metodo ad anello aperto di Ziegler-Nichols per la determinazione dei fattori di guadagno.

Questo metodo è stato sviluppato per determinare i valori iniziali di regolazione per i fattori di guadagno da usare negli anelli di controllo di processo, ed è molto utile per ottenere una soddisfacente caratteristica di controllo senza conoscere una soluzione rigorosa delle caratteristiche di risposta del processo. Il metodo si basa sull'impiego di un registratore a nastro di carta per sorvegliare la variabile di controllo del sistema mentre il sistema subisce un disturbo.
Anzitutto occorre aprire l'anello di controllo, in modo da poter introdurre manualmente nel sistema un disturbo ($\triangle$M), solitamente pari a circa il 10%. Quindi si osserva il tracciato della variabile rispetto al tempo, che sarà simile a quello mostrato in *Figura 6-25*, e si traccia una linea tangente al punto di flesso del tracciato. Il ritardo di reazione (L_r) è il tempo fra il disturbo e il punto in cui la linea tangente attraversa il valore prefissato della variabile controllata prima del disturbo (linea di base), e la velocità di reazione (R_r) è uguale all'inclinazione della curva di risposta nel punto di flesso. Sulla base di queste informazioni è possibile determinare, mediante alcune relazioni, i fattori di guadagno per ciascun tipo di controllo in funzione del tipo di anello controllato. La *Tabella 6-3* mostra come con le misurazioni effettuate in *Figura 6-25* si possano determinare K_p, T_i, e T_d; questi valori possono essere usati per regolare il sistema.

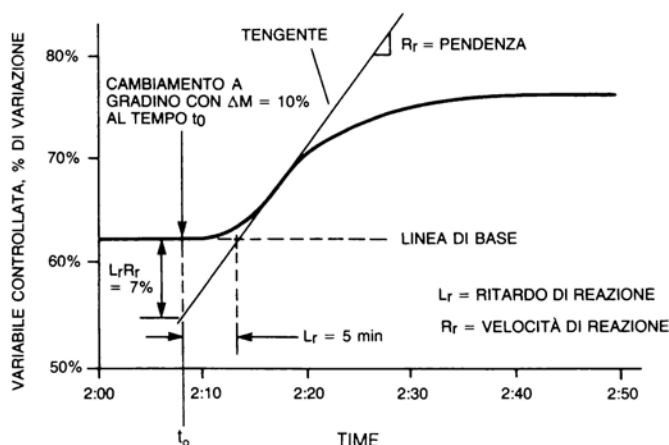



Figura 6-25. La risposta a un gradino fornisce dati per i metodi di regolazione ad anello aperto

Tabella 6-3. Fattiri di guadagno di Ziegler-Nichols ad anello aperto

Controllo solo proporzionale

$K_p = \Delta M/\Lambda_r R_r$

Controllo proporzionale-integrato

$K_p = 0.9\ \Delta M/L_r R_r$

$T_i = 3{,}33\ L_r$

Controllo proporzionale-integrato-derivato

$K_p = 1{,}2\ \Delta M/L_r R_r$

$T_i = 2L_r$

$T_d = 0{,}5L_r$

CHE COSA SI È APPRESO?

1. I sistemi sono controllati con controlli di tipo proporzionale, integrato o derivato, oppure con una combinazione del tipo proporzionale con altri tipi.

2. Ognuno di questi metodi può impiegare tecniche analogiche o digitali.

3. I sistemi di controllo possono anche essere parzialmente analogici e parzialmente digitali.

4. In un sistema esclusivamente proporzionale l'errore non può essere completamente eliminato.

5. In un sistema integrato il segnale di errore viene sommato su un dato periodo di tempo per produrre il segnale di controllo.

6. In un sistema derivato il controllo dipende dalla velocità con la quale il segnale di errore cambia rispetto al tempo.

7. I sistemi a microcalcolatore possono fornire tutte le funzioni PID usando tecniche digitali.

8. I sistemi a microcalcolatore sono estremamente versatili e possono usare hardware standard per effettuare vari compiti, ma richiedono notevoli capacità di programmazione.

9. I sistemi a microcalcolatore possono richiedere speciali apparecchiature per lo sviluppo del software.

10. I controllori programmabili sono molto più facili da usare, e utilizzano delle domande per guidare il programmatore attraverso le necessarie informazioni di input.

11. In un controllore programmabile, il controllo dell'anello PID è già presente. Devono essere soltanto forniti i parametri di guadagno, le costanti, gli indirizzi di input e output, ecc. I sistemi a microcalcolatore possono essere facilmente assemblati usando pannelli premontati che sono stati progettati per operare assieme al sistema.

Quiz per il Capitolo 6

1. Cos'è una variabile di processo?
   a. Una variabile controllata.
   b. Una variabile manipolata.
   c. Un parametro di processo che cambia valore.
   d. Tutto quanto sopra.

2. Cos'è il ritardo di processo?
   a. Il ritardo nel segnale di errore quando varia il valore prefissato.
   b. Il tempo richiesto dal sensore per rispondere ad un cambiamento.
   c. Il tempo necessario perché la massa del processo risponda ad un cambiamento di input.
   d. Tutto quanto sopra.

3. La maggior parte degli attuatori continui di controllo:
   a. usa un anello di input con corrente da 4 a 20 mA.
   b. è del tipo a proporzionamento di tempo.
   c. viene usata con anelli di controllo standard di tipo continuo.
   d. "a" e "c" sopra.
   e. tutto quanto sopra.

4. Un controllo a proporzionamento di tempo:
   a. può essere usato con un controllore programmabile PM550.
   b. non può essere usato con microcalcolatore TM990.
   c. è meno efficiente del normale controllo PID.
   d. "a" e "b" sopra.
   e. tutto quanto sopra.

5. Cos'è un controllo proporzionale?
   a. È un controllo con un'uscita discreta per ogni valore di errore.
   b. È un controllo in cui l'output del controllore varia con continuità in un certo campo.
   c. È un controllo in cui il guadagno è indipendente dallo scostamento residuo.
   d. Tutto quanto sopra.

6. Cos'è lo scostamento residuo?
   a. La differenza fra l'input dei sensori e il parametro assoluto rilevato.
   b. La differenza fra l'output del controllore e il valore della variabile manipolata.
   c. La differenza fra il valore di controllo prefissato e il valore reale.

7. Qual'è il vantaggio del controllo PI sul controllo proporzionale?
   a. Consente un minor guadagno proporzionale.
   b. Elimina lo scostamento residuo.
   c. È in grado di sopportare notevoli cambiamenti di carico senza ridurre l'accuratezza.
   d. Tutto quanto sopra.

8. Qual'è la differenza fra il controllo integrato e quello derivato?
   a. Il controllo integrato ha una risposta più lenta al segnale di errore.
   b. Il controllo derivato non elimina lo scostamento residuo.
   c. Il controllo derivato risponde alle variazioni della velocità con la quale cambia il segnale di errore.
   d. Tutto quanto sopra.

9. Il metodo di Ziegler-Nichols:
a. può essere usato per determinare i fattori di guadagno di un anello PI.
b. è un metodo di soluzione grafica.
c. è un metodo di controllo.
d. "a" e "b" sopra.
e. tutto quanto sopra.
f. nulla di quanto sopra.

10. Quali sono i due metodi disponibili per realizzare un controllo continuo di tipo elettronico?
a. Pneumatico e analogico.
b. Analogico e meccanico.
c. Analogico e digitale.
d. Nulla di quanto sopra.

11. Come viene realizzato il modo integrato usando metodi analogici?
a. Con un amplificatore operazionale e dei resistori.
b. Con un amplificatore operazionale e un condensatore.
c. Con un amplificatore operazionale e una rete RC per portare la tensione di errore ai capi del condensatore.

12. Come viene realizzato il modo integrato in un controllore digitale?
a. L'errore viene diviso in quantità discrete.
b. Il controllore digitale non può effettuare il modo integrato.
c. Il segnale di errore viene sommato su un intervallo di tempo discreto e viene accumulato dal controllore.

CAPITOLO 7

ESEMPI DI CONTROLLO DI SISTEMI SEMICONTINUI

IN QUESTO CAPITOLO

I sistemi semicontinui sono quelli in cui viene effettuata una sequenza di operazioni, in cui in ogni operazione è continua (per esempio, la trapanatura di un foro), ma le operazioni che si susseguono sono differenti l'una dall'altra (per esempio, spostamenti della parte in lavorazione e uso di differenti punte da trapano). L'apparecchiatura automatica può essere di tipo programmabile o non programmabile. Se occorre fabbricare per alcuni anni una notevole quantità di parti uguali, può essere scelta una macchina non programmabile, che è meno costosa. Tuttavia, per varie applicazioni è conveniente scegliere un sistema programmabile, poiché il riattrezzamento per la fabbricazione di una nuova parte sarà relativamente poco costoso.
L'automazione programmabile per la fabbricazione di parti semicontinue è chiamata controllo numerico. Questo capitolo descrive i sistemi a controllo numerico e due innovazioni che sono state loro apportate: il controllo numerico diretto e il controllo numerico a calcolatore.

CONTROLLO NUMERICO

Il controllo numerico (CN) è un metodo per controllare un sistema semicontinuo di fabbricazione di parti per mezzo di una serie di istruzioni (un programma) consiste in speciali raggruppamenti di lettere, numeri e simboli. Il programma è registrato su nastro di carta, su nastro magnetico o su un altro mezzo di registrazione, e viene letto dalla macchina ogniqualvolta viene effettuata una particolare operazione. Per scrivere un programma per controllo numerico esistono numerosi linguaggi, ma quello più usato è l'APT (dalle iniziali di "Automatically Programmed Tools"). L'APT è stato originariamente sviluppato nel 1956 al Massachusetts Institute of Technology, ma è stato modernizzato ed espanso varie volte. I lineamenti fondamentali dell'APT sono stati esposti nel Capitolo 5.

TIPICHE OPERAZIONI DI CONTROLLO NUMERICO

Se un'operazione comporta la produzione di numerose parti fatte con materiali grezzi di tipo similare, ma con variazioni nella forma e nelle dimensioni, il controllo numerico risulta conveniente. Anche se la quantità di produzione sono ridotte, il controllo numerico può essere economicamente conveniente, ma è necessario che la sequenza di operazioni sia tale da poter essere effettuata sulla stessa macchina. Tuttavia, per una completa fabbricazione di parti che comportano varie sequenze di operazioni fra loro differenti possono essere usate varie macchine a controllo numerico.
Alcune operazioni che possono essere effettuate su macchine a controllo numerico sono:

Piallatura	Controllo di qualità	Fresatura
Trapanatura	Posizionamento	Estrusione
Limatura	Saldatura	Tornitura
Stampaggio	Rivettatura	Montaggio
Taglio	Sabbiatura	

Le *Figure 7-1* e *7-2* mostrano delle tipiche macchine a controllo numerico. Quella in *Figura 7-2* è una macchina CNC; questo tipo sarà successivamente analizzato in questo capitolo.

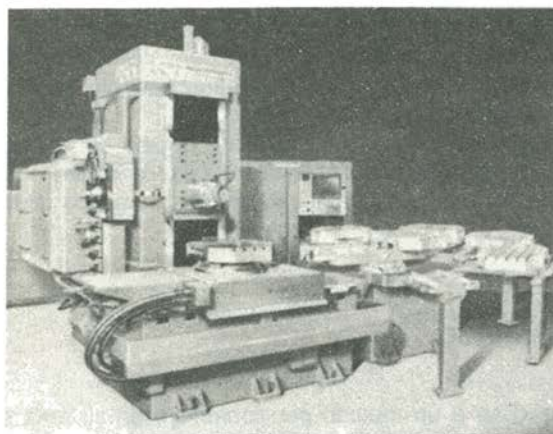



Figura 7-1. Macchina CN Kearney & Trecker (Per concessione della Kearney & Trecker Corporation)

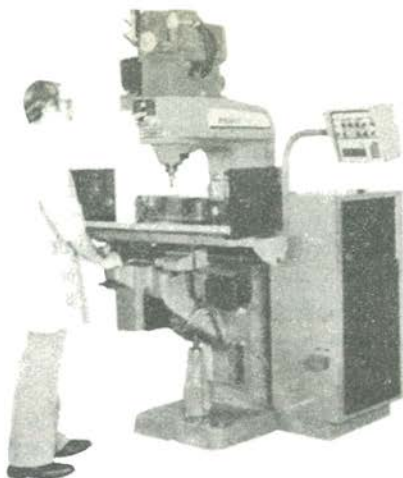



Figura 7-2. Macchina CNC Bridgeport (Per concessione della Bridgeport Machines Division of Textron Inc.)

TIPICO SISTEMA A CONTROLLO NUMERICO

Un tipico flusso per un sistema a controllo numerico è illustrata in *Figura 7-3.* Il programma a controllo numerico è una serie di istruzioni che viene letta dal controllore della macchina; è una sequenza passo a passo per controllare le funzioni di macchina allo scopo di fabbricare la parte.

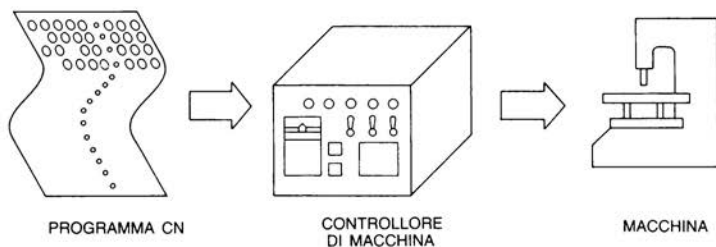



Figura 7-3. Tipico flusso di un sistema CN

Programma

Il programma di controllo numerico normalmente è contenuto su un nastro di carta, e ogni istruzione è rappresentata da una sequenza di perforazioni sul nastro. Il formato e le dimensioni del nastro standard della Electronic Industries Association (EIA) statunitense sono riportati in *Figura 7-4.* Ogni linea trasversale del nastro ha otto posizioni, e in ogni posizione è presente o assente un foro. Ciascuna posizione rappresenta un numero binario (bit) e otto bit (una linea) rappresentano un carattere (per esempio, A, B, 2, ecc.). Un insieme di uno o più caratteri forma una parola, e un insieme di parole forma un'istruzione completa chiamata blocco. Un insieme di blocchi costituisce il completo processo di lavorazione.

Controllore

Il controllore è un componente critico, poiché è l'elemento intermedio fra il programma a controllo numerico e la macchina che effettua le lavorazioni. Il suo compito consiste nel leggere un'istruzione dal nastro di carta, rilevando la presenza o l'assenza di fori, e tradurla in una serie di segnali di controllo. Questi segnali vengono applicati alla

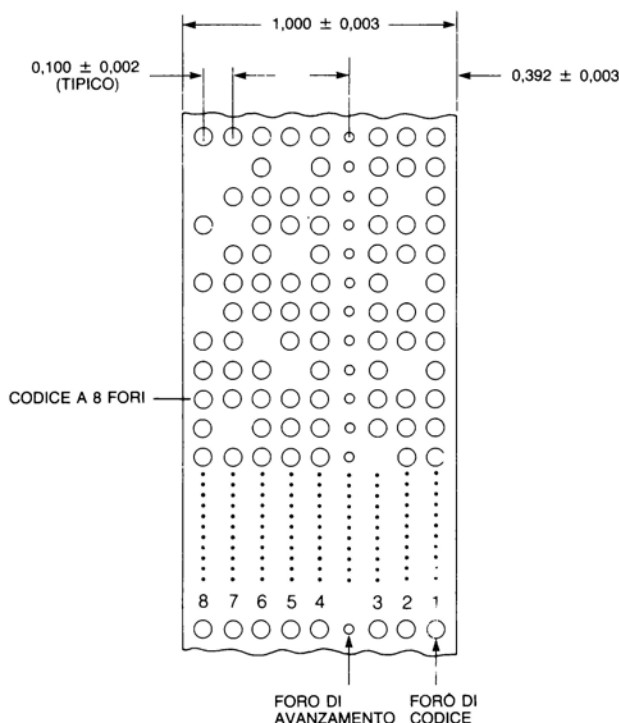



Figura 7-4. Nastro perforato standard EIA per controllo numerico (misure in pollici)

macchina per far sì che essa effettui le operazioni desiderate. Un controllore opererà soltanto con un determinato linguaggio di programmazione.
Alcuni controllori possono operare ad anello chiuso, e in questo caso la macchina riporta al controllore un segnale indicante ciò che la macchina ha effettivamente fatto. Il controllore può quindi confrontare l'operazione reale con quella desiderata, e se l'errore fra di esse è significativo può fermare ulteriori operazioni e/o avvisare l'operatore con una luce, con un suono o con entrambi. L'aggiunta di questa retroazione al controllore è costosa, e numerosi sistemi di nuova realizzazione sono privi di questa caratteristica poiché le nuove macchine sono molto precise e affidabili.
Il controllore informa anche l'operatore su funzioni che devono essere effettuate da persone, come il caricamento di materie prime, il cambiamento di utensili o l'asportazione del prodotto finito. In questo modo l'operatore non deve osservare continuamente una macchina e può svolgere anche altri compiti.

Macchina

Il componente finale di un sistema a controllo numerico è la macchina stessa. Questo componente normalmente è chiamato macchina utensile. Tuttavia, non tutti i sistemi di automazione a controllo numerico impiegano una macchina utensile; per esempio, un sistema CN può essere usato per disegnare a spruzzo etichette su differenti parti di un prodotto. In questo caso il prodotto viene spostato e le maschere di spruzzatura sono disposte in modo da stampare sul prodotto il corretto messaggio nel posto previsto; il sistema a controllo numerico controlla il movimento del prodotto, la scelta e il posizionamento della maschera e l'attivazione dello spruzzatore. In questo caso non è presente alcuna macchina utensile.
In tutti i casi il componente produttivo che svolge effettivamente il lavoro è una macchina, e le sue dimensioni e la sua complessità dipendono dalla lavorazione da effettuare e dalla quantità di materiale da trattare. La macchina ha dei comandi azionabili dall'operatore, e spesso ha un pannello di controllo per consentire un funzionamento manuale.
Nella *Figura 7-1* e *7-2* sono visibili i controllori per le macchine controllate.

COME USARE I SISTEMI A CONTROLLO NUMERICO

I passi necessari per l'uso di un sistema a controllo numerico dipendono dal sistema scelto e dal linguaggio di programmazione usato. Nel Capitolo 5 è stato descritto il linguaggio APT ed è stato fornito uno specifico esempio del suo impiego per la lavorazione di una parte. Tutti i sistemi, comunque, richiedono le stesse fasi fondamentali: 1. definizione della parte,
2. definizione delle operazioni,
3. sviluppo del programma.

COME DEFINIRE LA PARTE

La parte viene definita dimensionalmente in modo tale che sia chiaramente specificata la posizione di tutte le operazioni da effettuare. Per fare questo è necessario impiegare un sistema di riferimento con coordinate tridimensionali, onde descrivere il movimento della lavorazione o il pezzo da lavorare in riferimento al sistema di coordinate. In alcune

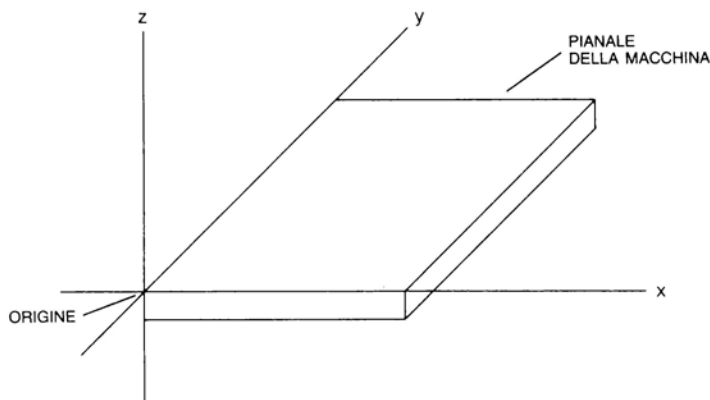



Figura 7-5. Sistema di coordinate per macchine CN

operazioni, come la trapantura, il *pezzo* verrà spostato da foro a foro. In altre operazioni, come la tornitura, l'*utensile* si sposterà lungo il pezzo da lavorare.
Se la macchina a controllo numerico ha un piano, o tavola, su cui è montata la parte, il sistema di coordinate viene definito rispetto a tale tavola, come mostrato in *Figura 7-5*. Gli assi x e y sono posti sulla superficie superiore della tavola e servono per le dimensioni orizzontali, mentre l'asse z è perpendicolare alla tavola e serve per dimensioni verticali (Nota: Le direzioni «orizzontale» e «verticale» sono qui usate con riferimento alla *Figura 7-5*; in realtà le coordinate potrebbero essere ruotate in qualsiasi piano). L'origine degli assi non deve essere necessariamente situata all'angolo della tavola come in figura, ma deve essere definita un'origine identificabile dal sistema a controllo numerico. I movimenti lungo questi tre assi sono chiamati movimenti traslatori.
Può anche essere definito un movimento rotatorio attorno a ciascuno dei tre assi; pertanto si possono usare fino a tre movimenti traslatori e tre movimenti rotatori per descrivere il pezzo da lavorare e il suo posizionamento passo a passo. Ciascun movimento viene chiamato «grado di libertà». I sistemi a controllo numerico hanno n gradi di libertà, dove n può essere 1, 2, 3, 4, 5 o 6, e la maggior parte dei sistemi ha almeno due gradi di libertà.
Si esamini il pezzo in *Figura 7-6*. Tutte le dimensioni sono fornite in modo che qualsiasi punto sul pezzo da lavorare possa essere definito con riferimento all'origine del sistema di coordinate, e le dimensioni sono sempre fornite nell'ordine x, y, z. Pertanto, il punto A verrebbe descritto come (9.0, 6.0, 0.0) e il punto B come (6.0, 6.0, 3.0).

COME DEFINIRE L'OPERAZIONE

L'operazione da effettuare su un pezzo da lavorare viene definita anzitutto specificando il punto di partenza e di arresto dell'utensile di taglio in base al sistema di coordinate, e quindi specificando il tipo di operazione.

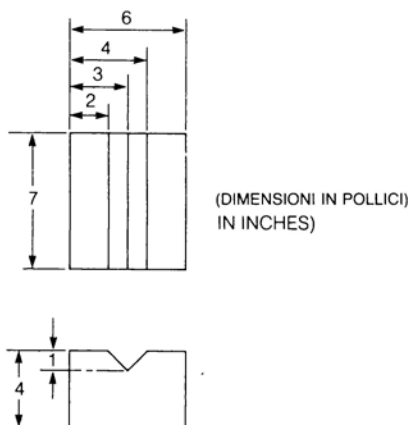
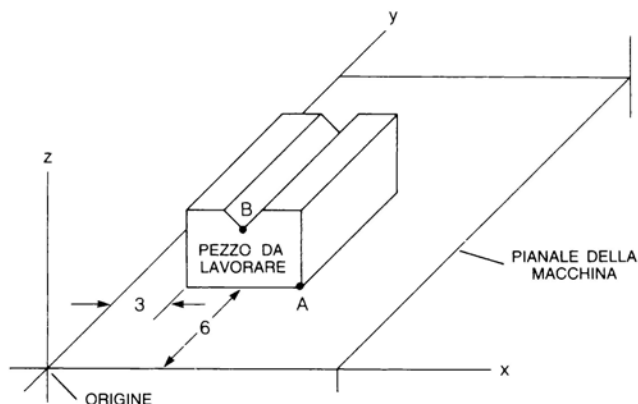



Figura 7-6. Posizione e dimensioni di un pezzo da lavorare

Se il sistema di coordinate viene definito sul piano superiore della tavola, la posizione «arretrata» o «di riposo» dell'utensile è nota, e se è stata appena completata una precedente operazione, devono essere specificate delle coordinate assolute rispetto all'origine oppure delle coordinate relative rispetto all'ultima posizione.

Controllo da punto a punto

Con riferimento alla *Figura 7-6*, si supponga di dover ricavare un canale a V in un blocco metalilco con una singola passata di un utensile da taglio. Si supponga inoltre che l'utensile si trovi in (8.0, 18.0, 8.0). L'estremità inferiore dell'utensile deve essere spostata verticalmente in corrispondenza al fondo del canale e deve essere spostata

e deve essere spostata orizzontalmente in un punto che si trova 1 pollice dietro al blocco sull'asse y, in corrispondenza al canale a V sull'asse x. Per specificare la posizione in coordinate assolute deve essere usato il seguente comando:

GO TO (6.0, 14.0, 3.0)

Per specificare la posizione in coordinate relative all'attuale posizione dell'utensile deve invece essere usato il comando:

GO DELTA (-20, -4.0, -5.0)

che che specifica una differenza (DELTA) rispetto all'ultima posizione (8.0, 18.0, 8.0). La nuova posizione viene calcolata dal controllore come (8.0 – 2.0, 18.0, – 4.0, 8.0 – 5.0) cioè (6.0, 14.0, 3.0), che è la stessa fornita in coordinate assolute nel comando GO TO. Questo tipo di operazione, chiamata controllore come (8.0 - 2.0, 18.0 - 4.0, 8.0 - 5.0) cioè (6.0, 14.0, 3.0), che è la stessa fornita in coordinate assolute nel comando GO TO. Questo tipo di operazione, chiamata controllo da punto a punto della macchina utensile, è la più elementare operazione di controllo.
In questo esempio si è supposto che il pezzo da lavorare sia fermo e si muova l'utensile; la stessa procedura e gli stessi comandi operano altrettanto bene se l'utensile è fermo rispetto a due assi e il pezzo da lavorare si muove, tuttavia in questo caso dovrebbe essere effettuata una correzione nei valori delle coordinate.
Una trapanatrice è un esempio di macchina con utensile fisso nelle direzioni x e y, ma mobile nella direzione z. La *Figura 7-7* mostra la tavola superiore di una trapanatrice avente una lastra metallica rettangolare con spessore di 1 pollice fissata su di essa. Si supponga che la punta del trapano (il fondo dell'utensile) sia attualmente situata in (16.0, 2.0, 1.5) e che la punta del trapano debba effettuare al centro della lastra un foro che in coordinate assolute è situato a (10.0, 6.0, 1.0). Il comando GO TO (10.0, 6.0, 1.0) farebbe spostare la punta da trapano sul centro del foro da effettuare, mentre in

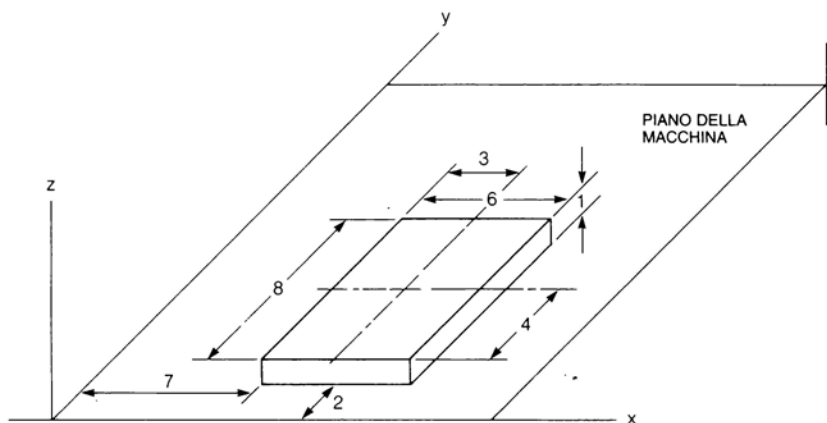



Figura 7-7. Pezzo da trapanare

coordinate relative il comando dovrebbe essre GO DELTA (–6.0, +4.0, –5.0). Se la punta del trapano viene poi spostata di (-2.0) lungo l'asse z, essa verrà forzata contro il metallo per trapanare il foro, e uno spostamento (+2.0) lungo l'asse z farà quindi arretrare la punta dal metallo.

Controllo in linea retta

Un secondo tipo di operazione è il taglio in linea retta. In questo caso l'utensile di taglio viene spostato parallelamente a uno dei tre assi con una velocità (la velocità di avanzamento) adatta al tipo di utensile e al materiale usato. Ci si riferisca nuovamente alla *Figura 7-6*, ricordando che l'utensile di taglio è stato lasciato in posizione pronta per tagliare il canale a V. Dopo che la macchina è stata avviata e l'utensile ha raggiunto la velocità necessaria, il comando GO TO (6.0, 5.0, 3.0) porta l'utensile in posizione di lavoro per intagliare il canale a V nel metallo, e lo fa arrestare 1 pollice davanti al pezzo da lavorare. Per effettuare questo taglio in linea retta è stata variata solamente la coordinata dell'asse y. I pezzi con forma rettangolare sono ideali per operazioni in linea retta.

Contornatura

La terza operazione, la contornatura, è molto più complessa delle operazioni da punto a punto o in linea retta, e può rchiedere il controllo contemporaneo di più di un asse affinché il movimento possa procedere contemporaneamente in due o tre direzioni. Come per le operazioni in linea retta, la velocità di avanzamento deve essere controllata in funzione della macchina utensile e del materiale.
Il più semplice movimento di contornatura è un taglio diagonale lungo il piano x-y, come mostrato in *Figura 7-8*; in *Figura 7-9* è mostrata una contornatura più complessa, ma

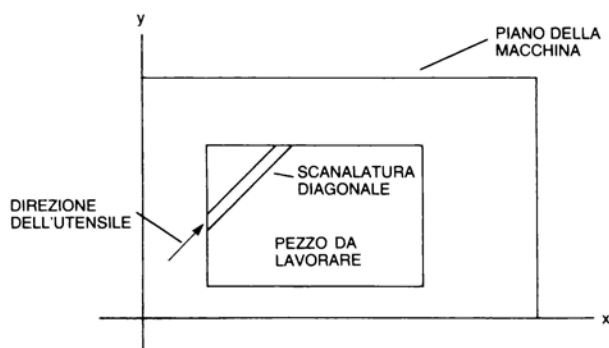



Figura 7-8. Semplice operazione di contornatura bidimensionale

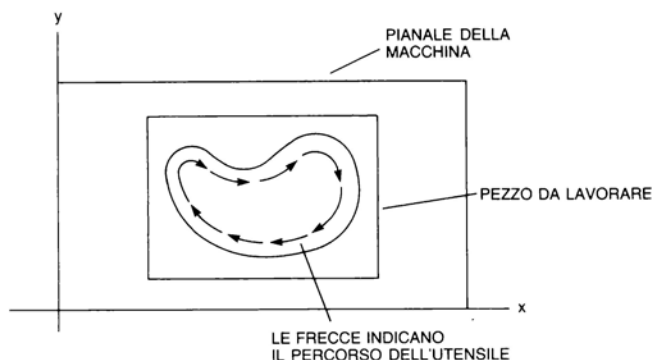



Figura 7-9. Operazione più complessa di contornatura bidimensionale

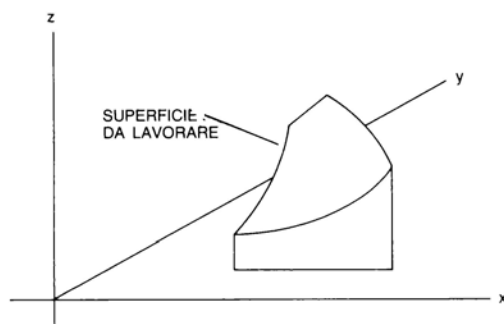



Figura 7-10. Complessa operazione di contornatura tridimensionale

ancora in due dimensioni. Per qualsiasi operazione di questo tipo, il movimento deve essere descritto geometricamente altrimenti non può essere effettuato mediante controllo numerico. In *Figura 7-10* è mostrato un contorno più complesso, di tipo tridimensionale, da lavorare su un pezzo; in questo caso sono necessari piccoli passi dimensionali programmati per lavorare la parte in tre dimensioni in conformità all'andamento geometrico.

COME SVILUPPARE IL PROGRAMMA

Ora che il pezzo da lavorare è stato descritto in base a un sistema di coordinate fisse e sono stati definiti i tipi di operazioni che la macchina deve effettuare, come viene scritto il programma di controllo per svolgere tali operazioni? La risposta dipende dal linguaggio di programmazione, e nel Capitolo 5 è stato fornito un esempio con il linguaggio APT. Tuttavia, per lo sviluppo di quasi tutti i programmi vi è una sequenza di passi comuni, che verranno ora brevemente analizzati.

Definizione del numero di sequenza e preprazione della macchina

Nella lavorazione di una parte complessa può essere necessario cambiare l'utensile e il tipo di operazione varie volte. Qualsiasi porzione di lavorazione che possa essere effettuata con lo stesso utensile e con lo stesso tipo di operazione viene chiamata sequenza, e ad essa viene dato un numero di sequenza che la identifica.

Esempio:

n003
g003
dove n003 indica il numero di sequenza 3 (in questo caso un'operazione di trapanatura) e g003 indica un'operazione da punto a punto.

Indicazione delle coordinate

Per un'operazione da punto a punto occorre specificare le coordinate del punto in cui l'operazione deve essere effettuata, e per operazioni in linea retta e di contornatura devono essere specificate le coordinate del punto d'inizio dell'operazione. Inoltre, per le operazioni in linea retta deve essere specificato il punto finale, e per la contornatura occorre descrivere la geometria del contorno. Continuando con l'esempio, le coordinate x e y del centro del foro da trapanare sono indicate da:

x3.711
y–0.960

Indicazione delle informazioni di utensile

Se deve essere usato un utensile differente, occorre listare il suo numero. Gli utensili solitamente sono numerati a partire da 1. Per esempio,
t03
indica di usare l'utensile numero 3. Si supponga che sia una punta da trapano da 0,375 pollici

Indicazione della velocità di avanzamento

Deve essere fornita la velocità di avanzamento dell'utensile in pollici al minuto. Per esempio, l'istruzione:
f60
dove f indica la velocità di avanzamento e 60 specifica il numero di pollici al minuto.

Indicazione della velocità di taglio

La velocità di taglio è la velocità di rotazione dell'asse dell'utensile espressa in giri al minuto, e questa indicazione deve essere fornita per l'operazione di taglio da effettuare. Per esempio, nell'istruzione:
s260
s indica che è un'istruzione per velocità di taglio, e 260 è la velocità in giri al minuto.

Indicazione di requisiti miscellanei

Si tratta di istruzioni speciali, come avviamento di macchina, attesa dell'operatore o cambiamento di utensile.
La forma è:

m07

dove m indica che si tratta di un'istruzione miscellanea e 07 indica la particolare istruzione da eseguire. Si supponga, in questo caso, che si tratti di far affluire il liquido di raffreddamento sulla punta da trapano.

Riunione

Combinando la sequenza di operazioni si ottiene:

```
.
.
.
n003
g00
x3.711
y–0.960
t0
f60
s260
m07
n004
.
.
```

Le sequenze n001 e n002 precedono la n003, e la n004 segue qualora siano richieste operazioni tradizionali. La sequenza 3 determina la trapanatura di un foro nella posizione (3.711, –0.960) con una punta da trapano da 0.375 pollici. Il foro viene trapanato con un avanzamento di 60 pollici al minuto e una velocità di rotazione di 260 giri al minuto, e durante l'operazione viene usato il liquido di raffreddamento.

CONTROLLO NUMERICO A CALCOLATORE

Come esposto in precedenza in questo stesso capitolo, per il controllo numerico viene generato un nastro di carta perforato che contiene il programma per un determinato compito. Questo nastro deve essere letto per ogni pezzo da lavorare; se la produzione è di 1000 unità per settimana, il nastro dovrà essere letto 1000 volte alla settimana. Naturalmente vengono fatti dei duplicati, in modo da poter sostituire un nastro consumato, ma il nastro e il suo lettore meccanico sono le cause più frequenti di guasti nei sistemi a controllo numerico. Nel controllo numerico a calcolatore (CNC) per immagazzinare il programma viene usata una memoria di calcolatore, anziché un nastro,

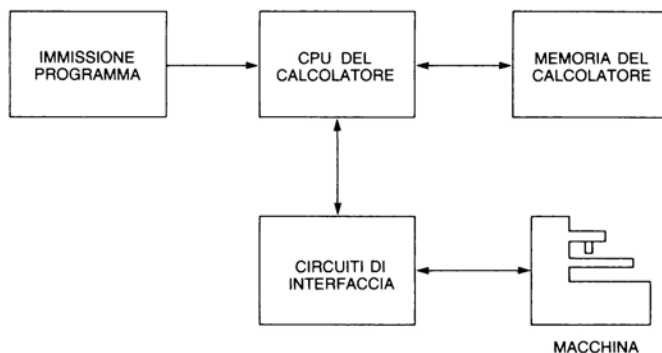



Figura 7-11. Un sistema CNC

e il programma viene letto elettronicamente. Così non vi sono parti in movimento o nastri che possano provare dei guasti. Il calcolatore è dedicato alla macchina da controllare e solitamente è situato vicino ad essa.
Un tipico schema di sistema CNC è mostrato in *Figura 7-11*. L'input del programma originale può provenire ancora da un nastro di carta o da un nastro magnetico, oppure può essere immesso direttamente da una tastiera. Il programma, dopo essere stato caricato dalla fonte esterna, viene immagazzinato nella RAM del calcolatore e non ha bisogno di essere reimmesso sino a quando non deve essere cambiato, a meno che venga a mancare energia elettrica al calcolatore. Nelle macchine di vecchio modello il calcolatore può essere un minicalcolatore, ma i nuovi sistemi CNC usano quasi sempre dei microcalcolatori, per motivi di riduzione di ingombro e di costo. L'unità di interfaccia fornisce il condizionamento necessario per cambiare i segnali di output del calcolatore nel tipo di segnali richiesti dalla macchina, come esposto nei Capitoli 3 e 4.

Oltre al vantaggio della memoria elettronica, i sistemi CNC hanno altri vantaggi sui sistemi tradizionali a controllo numerico. Il tempo di approntamento o di sviluppo per un nuovo processo viene ridotto, poiché la correzione e l'ottimizzazione dei programmi sui sistemi CNC può essere fatta facilmente. Questa possibilità di programmazione aumenta anche la produttività della macchina, poiché è semplice variare il programma ed effettuare le regolazioni per ottimizzare i movimenti della macchina stessa.
Poiché il calcolatore ha la facoltà di svolgere calcoli matematici, può essere effettuata una contornatura più complessa, e la facilità nel ricevere input dai sensori rende più facile il controllo ad anello chiuso e consente di sorvegliare e variare continuamente gli elementi del processo in modo da ottenere i migliori risultati. Per esempio, la velocità di avanzamento di una punta da trapano può essere aumentata fino a quando il rallentamento del motore è eccessivo o la temperatura della punta supera un livello predeterminato; a questo punto la velocità di avanzamento deve essere ridotta. Un metodo di questo tipo consente di trapanare fori con la massima velocità possibile

senza bruciare le punte o sovraccaricare il motore del trapano. Questo è chiamato controllo adattivo, e la sua applicazione consente un aumento di produttività.
Un altro vantaggio del controllo CNC è che il calcolatore può verificare il proprio funzionamento e quello della macchina. Nella memoria del calcolatore possono essere contenuti programmi diagnostici per rilevare o localizzare guasti elettronici o meccanici, e questi programmi possono essere previsti in modo che operino automaticamente o sotto il controllo di un operatore. Ne consegue che la macchina stessa è in grado di localizzare ed identificare le cause dei difetti e dei guasti. Un altro vantaggio del sistema CNC è l'ulteriore uso delle capacità grafiche e di calcolo del calcolatore; per esempio, il calcolatore può facilmente fornire dati statistici, come la produttività giornaliera. Un ulteriore vantaggio del sistema CNC è la sua compatibilità con un controllo numerico diretto.

CONTROLLO NUMERICO DIRETTO

Se un piccolo calcolatore è in grado di controllare direttamente una macchina in un sistema CNC, è ragionevole pensare che un grande calcolare possa controllare varie macchine. Questa, infatti, è una possibilità reale e il sistema risultante è chiamato sistema a controllo numerico diretto (CND). Un calcolatore CND può controllare fino a

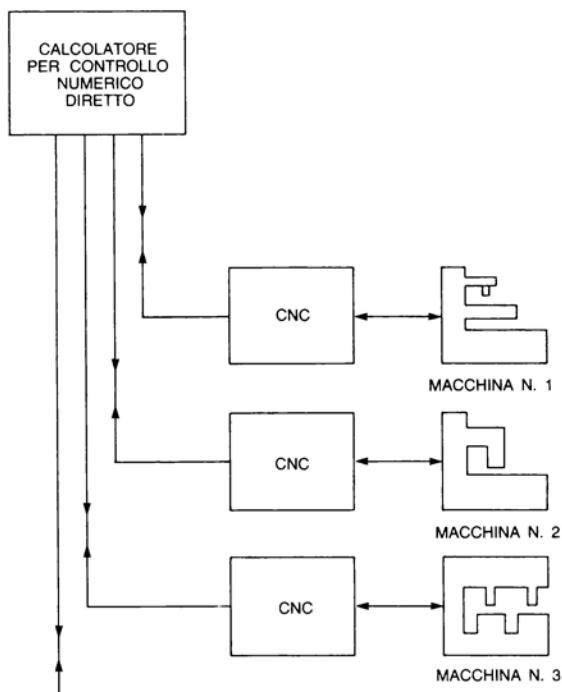



Figura 7-12. Sistema a controllo numerico diretto

256 macchine, ma la maggior parte dei sistemi CND ne controlla un numero inferiore. Storicamente, i sistemi CND sono arrivati sulla scena prima dei CNC. Le più vecchie macchine CND usavano controllori totalmente a hardware anziché calcolatori collegati a ciascuna macchina, ma i loro programmi erano caricati direttamente dalla memoria di un grande calcolatore centrale anziché da un nastro di carta. Lo sviluppo dei sistemi CNC si è inserito spontaneamente nei sistemi CND e ha offerto dei vantaggi immediati. Il calcolatore centrale di un sistema CND è situato distante dalle macchine controllate ed è collegato ad esse mediante cavi, chiamati linee di comunicazione. La *Figura 7-12* mostra una possibile disposizione CND. Il calcolatore CND effettua una supervisione del funzionamento di tutte le macchine in tempo reale, sceglie e carica i programmi di controllo delle macchine nei sistemi CNC, riceve rapporti sullo stato delle macchine ed emette richieste di servizio. Un operatore da ciascun sistema CNC può porre domande al calcolatore CND e può ricevere risposte ed istruzioni. Il calcolatore CND può anche immagazzinare dati relativi al funzionamento e alla produttività di tutte le macchine e usare tali dati per preparare rapporti e analisi. Un grosso svantaggio dei sistemi CND è che l'intera lavorazione rischia di bloccarsi se il calcolatore CND si guasta.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. Il controllo automatico di un sistema semicontinuo di fabbricazione di parti mediante un programma di istruzioni viene chiamato controllo numerico.
2. I principali componenti di un sistema CN sono il programma, il controllore e la macchina.
3. Lo sviluppo del programma richiede la definizione del pezzo da lavorare in un dato sistema di coordinate e la scelta di operazioni da punto a punto, in linea retta o di contornatura. Questa scelta è limitata dalle possibilità delle macchine.
4. Se il programma è contenuto in un nastro che deve essere letto per ogni operazione mediante un controllore privo di calcolatore, il risultato è un sistema CN standard.
5. Se il controllore viene sostituito da un calcolatore e il programma è immagazzinato nella memoria di quest'ultimo, il risultato è un sistema CNC.
6. Se viene usato un calcolatore centrale per controllare più di una macchina, il risultato è un sistema CND.
7. Un corretto uso dei concetti CN, CNC o CND determina un aumento di produttività e ad una diminuzione dei costi di produzione nelle fabbricazioni che comportano operazioni semicontinue.

Quiz per il Capitolo 7

1. Funzionamento semicontinuo significa che:
   a. l'operatore può concedersi brevi periodi di interruzione nello svolgimento del suo lavoro.
   b. il funzionamento è continuo in ciascun turno, ma si ferma fra due turni successivi.
   c. un calcolatore è una parte essenziale per la macchina.
   d. ciascuna operazione di una sequenza è continua, ma successive operazioni della sequenza possono essere differenti.

2. Il controllo numerico:
   a. è un metodo per controllare il funzionamento di una macchina mediante una serie di istruzioni.
   b. si applica soltanto alle fresatrici.
   c. è un metodo per produrre un esatto numero di parti all'ora.
   d. nulla di quanto sopra.

3. Quali dei seguenti componenti sono presenti in un tipico sistema CN?
   a. Input a nastro.
   b. Controllore.
   c. Macchina utensile.
   d. Tutto quanto sopra.

4. Il sistema di coordinate usato per descrivere un pezzo da lavorare:
   a. cambia da parte a parte.
   b. è sempre bidimensionale.
   c. è definito rispetto ad un punto della macchina.
   d. tutto quanto sopra.

5. Le operazioni in linea retta:
   a. devono essere limitata a due per ogni pezzo in lavorazione.
   b. devono essere parallele ad uno degli assi del sistema di coordinate.
   c. possono includere i tagli diagonali che non siano curvi.
   d. tutto quanto sopra.

6. Cosa non è specificato in un programma di calcolatore?
   a. La velocità di taglio.
   b. La velocità di avanzamento.
   c. Il tempo richiesto per lavorare un pezzo.
   d. Il tipo di operazione.

7. Un inconveniente del controllo numerico è che:
   a. il calcolatore non è affidabile.
   b. il nastro e il lettore di nastro non sono affidabili.
   c. la macchina utensile può facilmente surriscaldarsi.
   d. è necessario un operatore per ogni macchina.

8. Controllo numerico diretto significa:
   a. usare i calcolatori per controllare una grande macchina.
   b. usare un calcolatore per controllare parecchie macchine.
   c. eliminare i calcolatori dal processo di fabbricazione.
   d. eliminare completamente la necessità di avere un operatore.

9. Se l'utensile di un sistema CN deve espostarsi dalla posizione (10, 10, 10) di due unità verso

lo zero nella direzione x, deve allontanarsi di 4 unità dallo zero nella direzione y, e deve avvicinarsi di 6 unità verso lo zero nella direzione z, l'istruzione deve essere:
a. GO DELTA (–2.0, –4.0, +6.0)
b. GO DELTA (–2.0, +4.0, –6.0)
c. GO DELTA (+2.0, –4.0, +6.0)
d. GO DELTA (–2.0, –4.0, –6.0)

10. Nel qui 9, la posizione finale dell'utensile dopo avere eseguito l'istruzione è:
a. (8, 14, 4)
b (12, 6, 16)
c. (12, 14, 16)
d. (8, 6, 4)

CAPITOLO 8

FABBRICAZIONE DI PARTI SEPARATE USANDO CONTROLLORI PROGRAMMABILI

IN QUESTO CAPITOLO

Questo capitolo tratta l'uso di controllori programmabili per la fabbricazione di parti separate. Nella prima parte è analizzato il funzionamento del controllore programmabile in relazione alla logica a relè, e quindi sono analizzate le effettive applicazioni di un controllore programmabile spiegando come opera la macchina controllata. Un controllore programmabile per il controllo di queste applicazioni deve essere scelto soltanto dopo un'attenta valutazione dei vantaggi e degli svantaggi che esso offre. Sono forniti alcuni motivi per l'impiego di un controllore programmabile e sono analizzate le questioni che devono essere considerate nella scelta di un particolare controllore. In ogni caso, in un controllore programmabile la flessibilità, l'affidabilità e la facilità di superare gli inconvenienti sono dei notevoli vantaggi sugli altri tipi di controllo. Sono infine forniti un sommario e una spiegazione dei parametri e delle specifiche più importanti di un controllore programmabile al fine di consentire una valutazione di queste unità.

INTRODUZIONE AL CONTROLLO PROGRAMMABILE

La maggior parte dei processi di fabbricazione impiegati per realizzare un prodotto richiede una sequenza di istruzioni, in particolare per la produzione di parti separate, e la messa in sequenza può essere fatta manualmente con l'ausilio di un controllore. Sino alla fine degli anni sessanta, la messa in sequenza delle operazioni per la fabbricazione di parti separati e molte altre operazioni per la fabbricazione solitamente erano effettuate usando un gruppo di relè collegati in modo da svolgere un compito particolare, e pertanto l'uso della logica a relè è ben noto nella maggior parte delle industrie. Tuttavia, poiché la logica a relè può essere difficile da mantenere in funzione e da modificare, era necessario un sistema più affidabile e standardizzato. Questi fatti, unitamente alla disponibilità di funzioni logiche a semiconduttori, hanno condotto allo sviluppo del controllore elettronico di tipo programmabile. Poiché la logica a relè era ben nota, i progettisti hanno sviluppato un controllore programmabile in grado di usare lo stesso «linguaggio» e gli stessi diagrammi a scala della logica a relè; ciò ha consentito ai tecnici di programmare l'uso dei controllori con un minimo sforzo.

Spiegazione del diagramma a scala

La *Figura 8-1a* mostra un motore collegato ad una sorgente di alimentazione attraverso un interruttore, e la *Figura 8-1b* mostra il diagramma a scala equivalente. Nel diagramma a scala la sorgente di alimentazione è rappresentata dai due «montanti» verticali della scala, e i vari circuiti di controllo costituiscono i «gradini». I contatti normalmente aperti di un interruttore o di un relè sono simbolicamente rappresentati da due linee parallele verticali, come mostrato in *Figura 8-1b* (non si confonda questo simbolo con l'analogo simbolo dei condensatori usato sugli schemi dei circuiti elettronici), mentre i contatti normalmente chiusi sono rappresentati da due linee parallele intersecate da una linea diagonale. I relè di controllo sono indicati da una C, gli input da una X e gli output da un cerchio e da una Y.

a. Schema elettrico di un motore con interruttore

b. Diagramma a scala equivalente

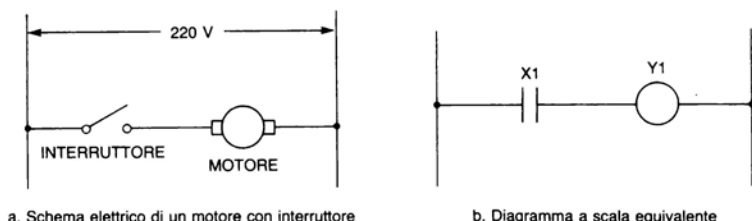



Figura 8-1. Schemi di controllo di motore

La *Figura 8-2* mostra altri modi per controllare il motore. Si considerino X1, X2, X3 e X4 come contatti di interruttori in posizione OFF. In *Figura 8-2a*, se l'interruttore X1 o X2 è portato in ON, il contatto X1 o X2 si chiude e il motore viene eccitato; questa è chiamata condizione OR. In *Figura 8-2b* entrambi gli interruttori X1 e X2 devono essere ON affinché i contatti X1 e X2 siano chiusi al fine di eccitare il motore; questa è chiamata condizione AND. In *Figura 8-2c*, quando l'interruttore X4 è in OFF il motore è eccitato attraverso una serie di contatti normalmente chiusi (X4). Quando X4 è portato in ON, i suoi contatti normalmente chiusi si aprono e il motore può essere eccitato soltanto portando in ON l'interruttore X1 o X3 per chiudere il contatto X1 o il contatto X3. Se entrambi gli interruttori X2 e X4 sono portati in ON, i loro contatti normalmente chiusi si apriranno, quindi l'unico modo per eccitare il motore è di portare X3 in ON.

Relè di controllo

In *Figura 8-3a* è mostrato schematicamente un relè di controllo. Oltre a fornire una capacità di decisione attraverso i circuiti logici, un relè viene usato al posto di un interruttore per controllare l'alimentazione da una posizione lontana e/o per controllare un dispositivo ad alta tensione o ad alta corrente mediante un interruttore a bassa

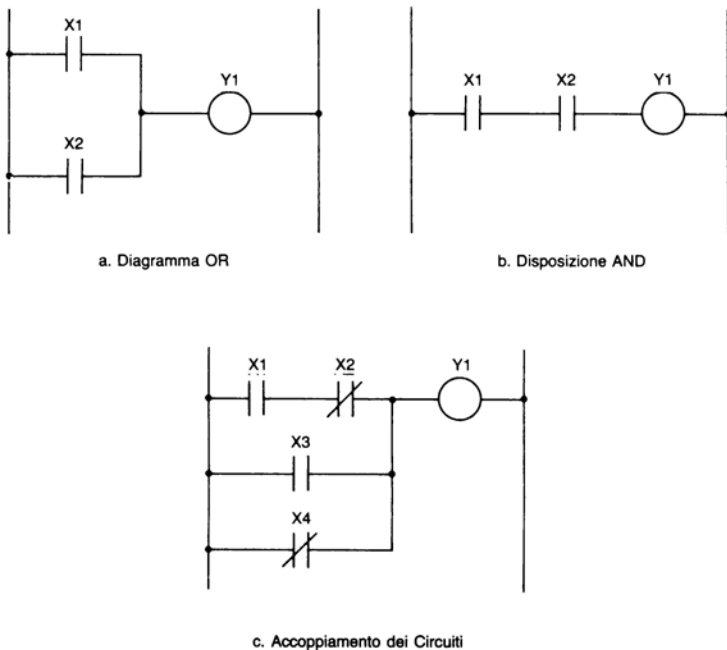



Figura 8-2. Diagramma a scala per un più complesso controllo di un motore

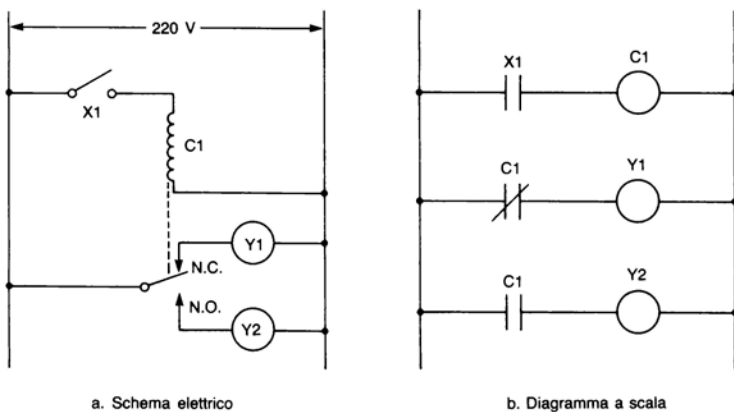



Figura 8-3. Diagrammi per dispositivi controllati tramite relè

tensione o a bassa corrente. Quando l'interruttore di controllo X1 è aperto, come mostrato, il relè C1 viene diseccitato e l'output Y1 è collegato alla rete a 220 volt tramite i contatti normalmente chiusi (N.C.) di C1. Quando X1 è chiuso, la bobina di C1 è eccitata e il contatto mobile si muove per chiudere i contatti normalmente aperti (N.O.); ora l'energia è tolta da Y1 e applicata a Y2. Si noti che tutte le parti dello stesso relè sono designate mediante lo stesso numero C nel diagramma a scala equivalente rappresentato in *figura 8-3b.*
Prima che fossero sviluppati i controllori programmabili elettronici, le funzioni erano effettuate da un hardware a relè con un cablaggio fisico. Quando è usato un controllore programmabile, il solo hardware a relè è quello richiesto per gli output della macchina; tutte le funzioni logiche usate per immagazzinare uno stato di sequenza o per combinare percorsi logici multipli sono ralizzate con una logica digitale mediante circuiti a stato solido indicati nello schema e nella programmazione come «relè di controllo», poiché nel metodo a relè sarebbe stato usato un hardware a relè. Questi «relè di controllo» non sono dei relè reali, ma soltanto delle posizioni in una memoria a stato solido. Il contenuto in codice digitale di queste posizioni rappresenta lo stato di un «contatto di relè», e pertanto lo stato di questi «contatti» viene determinato esaminando il contenuto della memoria anziché determinando se un contatto di un relè reale è aperto o chiuso.

Sicurezza

Poiché l'hardware dei controllori programmabili è completamente a stato solido (senza parti in movimento) e il funzionamento dei circuiti logici di controllo avviene in memoria anziché con dei relè, viene eliminato il prblema dei cambiamenti indesiderati di temporizzazione nell'apertura e chiusura dei contatti a relè. Tali cambiamenti di temporizzazione, che sono comuni nei circuiti a relè, possono alterare la sequenza di macchina e provocare un funzionamento scorretto. Una memoria a stato solido invece è molto affidabile e di norma ha una vita media molto maggiore di quella di un contatto di relè.

Temporizzatori

Gli equivalenti elettronici dei temporizzatori sequenziali a tamburo di tipo elettromeccanico, come i temporizzatori a supero di tempo e i contatori, che sono presenti nei controllori hanno soltanto bisogno di essere programmati per l'uso, senza richiedere alcun hardware addizionale. Le prestazioni di un controllore programmabile spesso possono semplificare e migliorare le caratteristiche di un sistema di controllo senza aumentarne il costo. In sintesi, i controllori programmabili effettuano tutte le funzioni dei relè, dei temporizzatori e dei contatori elettromeccanici; possono effettuare calcoli matematici ed essere facilmente programmati senza richiedere un nuovo cablaggio, e hanno un funzionamento molto più affidabile.

Unità periferiche intelligenti

Sebbene questa analisi riguardi soltanto l'impiego di controllori programmabili di tipo digitale, la distinzione fra questi controllori e quelli di tipo analogico è poco netta. Per esempio, è possibile aggiungere un'unità periferica di input/output di tipo «intelligente» al dispositivo di sequenza del controllore programmabile. Il controllore programmabile non soltanto è intelligente, ma può anche incorporare delle capacità analogiche di input/

output. Queste unità periferiche sono semplicemente inserite e disinserite dall'unità di sequenza principale ed effettuano le loro operazioni indipendentemente dall'unità principale. Le unità intelligenti possono effettuare compiti come il controllo di un motore a passi, interfacciamenti seriali di comunicazione e controllo analogico PID.

COME FUNZIONA UN CONTROLLORE PROGRAMMABILE

Il controllore programmabile quando è usato per automatizzare una macchina opera essenzialmente come un ordinatore di sequenza programmabile. Rileva le condizioni di input che interessano e sulla base di tali condizioni risolve le equazioni logiche programmate dal tecnico di controllo. Quindi regola gli attuatori di output per fornire le azioni richieste dalla soluzione delle equazioni logiche. Lo schema a blocchi in *Figura 8-4* mostra i quattro blocchi funzionali principali di un controllore programmabile. Si supponga di usarlo per controllare una macchina.

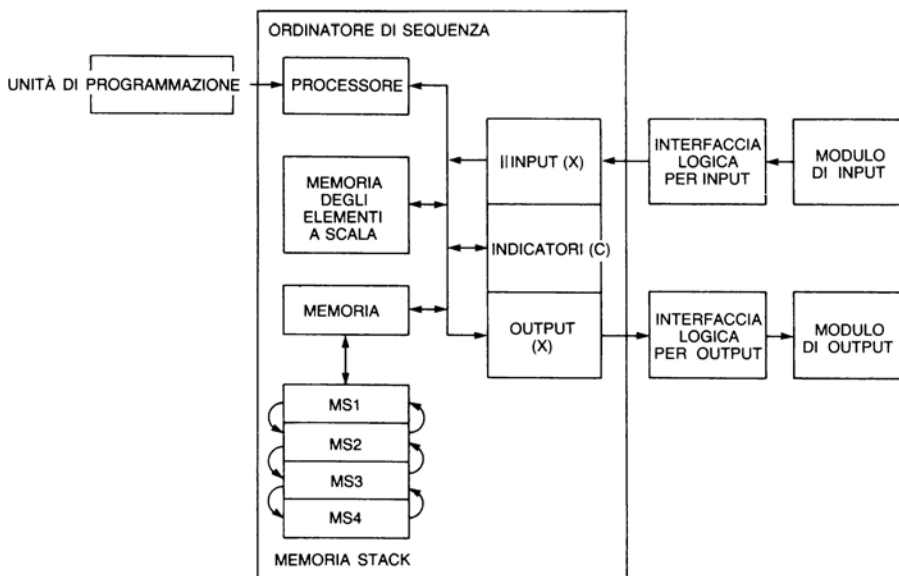



Figura 8-4. Diagramma a blocchi funzionale di un controllore programmabile

Input

Il blocco di input consente all'ordinatore di sequenza di rilevare i parametri di input della macchina. Questi parametri possono essere commutatori azionati dall'operatore e usati per impostare e scegliere i modi di funzionamento della macchina, interruttori limite usati per rilevare la posizione o la presenza di una parte, e altri sensori o interruttori usati per dispositivi di sicurezza o per rilevare irregolarità di funzionamento. In breve, qualsiasi parametro esterno che deve essere fornito al controllore affinché questo prenda la corretta decisione quando comanda una macchina, viene fornito tramite il blocco di input.

Ordinatore di sequenza

Il blocco dell'ordinatore di sequenza effettua le stesse operazioni di temporizzazione, aggancio e controllo che sono effettuate dai relè, ma le operazioni vengono svolte mediante logica programmabile a stato solido anziché con componenti discreti cablati. La logica di sequenza è basata su codici digitali che usano gli stessi segnali logici descritti in precedenza.

Unità di programmazione

La sequenza viene controllata mediante un programma, definito dall'utente, che contiene i passi necessari per eseguire il compito in base al diagramma a scala equivalente alla logica a relè. Il programma viene immesso dall'utente tramite il blocco di programmazione. L'ordinatore di sequenza ha un programma operativo – talvolta chiamato microprogramma – in base al quale il suo hardware analizza i passi del programma dell'utente e li esegue in conformità a predeterminate regole del sistema.

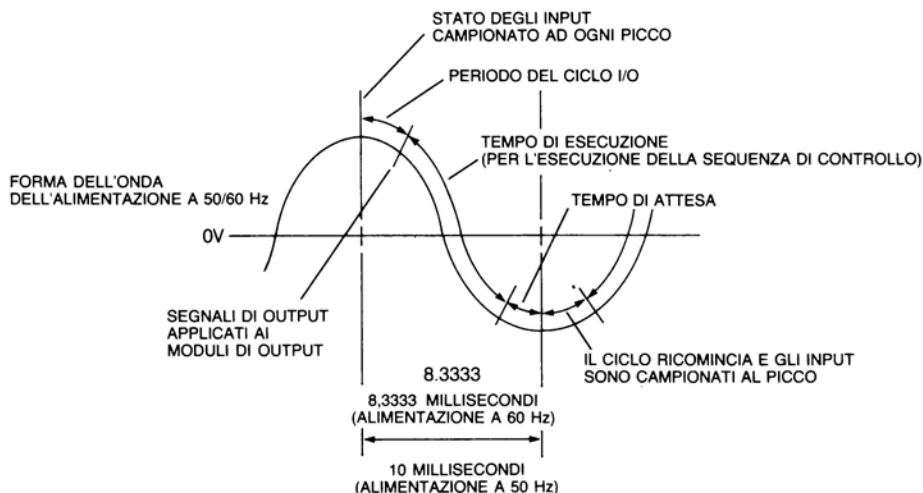



Figura 8-5. Tipico diagramma di I/O e sequenza di tempificazione

Output

Nel blocco di output i punti di output sono portati in ON e in OFF in conformità ai risultati della logica a scala sulla base degli input presenti in ogni momento. Si ricordi che lo stato degli output è immagazzinato in memoria; ciò significa che lo stato ON o OFF di questi output può essere usato in altre equazioni con logica a scala semplicemente facendo in modo che il programma esamini il contenuto delle appropriate posizioni di memoria. Se invece venissero usati dei relè cablati, ogni equazione logica richiederebbe l'impiego di un gruppo separato di contatti per ogni particolare output.
La sequenza reale per la lettura degli input, per la soluzione della sequenza di controllo sulla base delle condizioni di input e per la conseguente regolazione degli output, viene effettuata in un punto del ciclo determinato dalla frequenza della linea di alimentazione esterna, come mostrato in *Figura 8-5.* A 50 Hz il tempo di scansione è di 10 millesecondi per 1024 parole (1K) di memoria; a 60 Hz il tempo si riduce a 8,3 millisecondi. Il tempo di scansione aumenta di 10 (8,3) millisecondi per ogni 1K addizionale di memoria.

CONTROLLO DI UN MANIPOLATORE DI SACCHI MEDIANTE PC

Un esempio di piccola macchina che impiega un controllore programmabile è un manipolatore per riempire sacchi con fertilizzante, cibo per animali o altri tipi di prodotti sfusi solidi.
Il funzionamento di base della macchina è semplice. Un operatore mette i sacchi su un apposito alimentatore presente nella macchina. Il resto del funzionamento può essere svolto in modo totalmente automatico o può essere controllato manualmente, a scelta dell'operatore. Ogni sacco viene singolarmente prelevato dall'alimentatore e posto sotto ad una tramoggia di riempimento, dove viene riempito con una quantità di materiale precedentemente pesata; viene quindi lasciato cadere su un convogliatore a nastro che lo trasferisce alla stazione di chiusura.

Scelta di un controllore

Questa macchina ha meno di dieci parti mobili, che tuttavia sono usate per milioni di cicli all'anno in un ambiente molto polveroso. In passato, il controllo di questo tipo di macchina avrebbe potuto essere realizzato con un gruppo di relè e con alcuni temporizzatori, ma in questa applicazione il tipo di controllore programmabile considerato e il numero totale di punti input/output sono tali che il costo dei relè è pressoché identico a quello del controllore programmabile. Di norma, il costo di un controllore programmabile sarà all'incirca eguale a quello di un hardware a relè se è usato per almeno due terzi o più della sua capacità di input/output. Se sono necessari soltanto pochi relè, il controllore programmabile può tuttavia essere ancora conveniente, anche se il costo è maggiore, per la maggior flessibilità, affidabilità e facilità d'impiego; infatti esso consente un minor tempo di sviluppo della macchina e, cosa più importante, abbrevia sensibilmente i tempi di riparazione e verifica della macchina, con un conseguente risparmio di tempo e una migliore soddisfazione dell'utente.
Per questo trasferitore di sacchi, i tecnici di controllo hanno sviluppato un controllore locale anziché utilizzare un sistema di controllo centrale, e il controllore locale è stato progettato per operare sia in modo automatico sia in modo manuale. Ciò ha facilitato la localizzazione dei guasti e ha semplificato la progettazione.

Progettazione della macchina

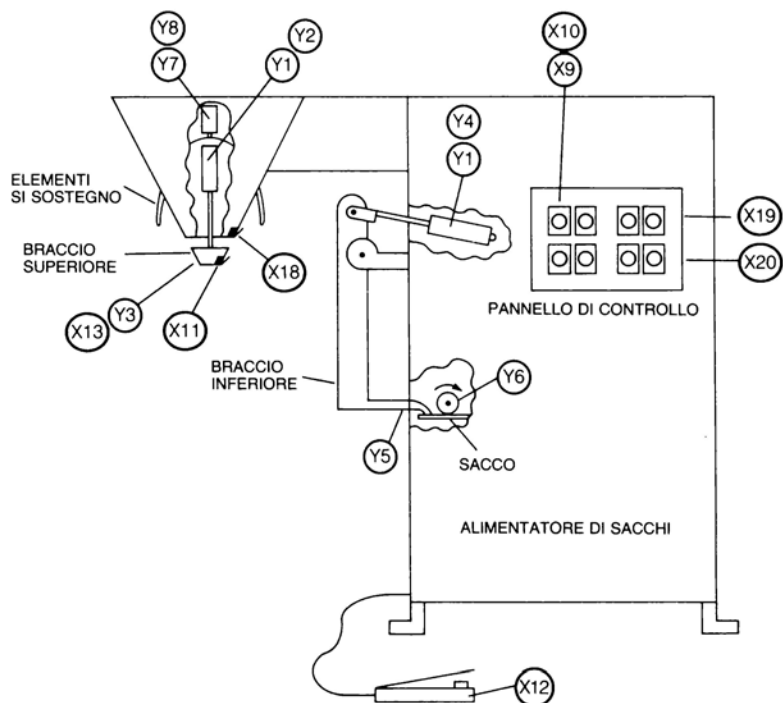
Oltre a dover scegliere il tipo di controllore, i progettisti della macchina si sono trovati di fronte a un certo numero di alternative. Per esempio, hanno dovuto scegliere la velocità operativa della macchina e le dimensioni dei sacchi utilizzabili. Inoltre hanno dovuto considerare le fonti di energia disponibili e gli altri impianti presenti nello stabilimento.

Per il progetto finale sono state scelte delle ventose a depressione per prelevare il sacco dalla pila e per trasportarlo alla tramoggia di riempimento. A causa del notevole peso del sacco pieno, è stato usato un gruppo di elementi meccanici di bloccaggio per reggere il sacco attorno alla tramoggia durante il riempimento. Inoltre, poiché in vari momenti dovevano essere usati sacchi di lunghezza differente, nell'alimentatore di sacchi è stato previsto un meccanismo a rulli per spingere la parte di fondo di un sacco al di fuori della tramoggia. Ciò è stato necessario poiché i bracci di presa dei sacchi non avevano un'estensione sufficiente per estrarre completamente un sacco lungo; usando un dispositivo a rulli, la dimensione fisica della macchina non ha dovuto essere aumentata per trattare sacchi lunghi.

Sono stati scelti due bracci di manipolazione: uno per prendere il sacco dalla pila mediante ventose a depressione e per portarlo alla tramoggia di riempimento e l'altro, anch'esso usante delle ventose a depressione, per collocarlo attorno alla tramoggia. È stato necesario progettare dei comandi per ciascun bracci e per gli elementi meccanici che sostengono il peso del sacco pieno. I cilindri meccanici a doppia azione che spostano i bracci e gli elementi meccanici di aggancio sono azionati con aria in pressione, che viene controllata da valvole e solenoide comandate dal controllore programmabile. Anche per controllare le ventose di sostegno dei sacchi vengono usate delle valvole a solenoide. Una valvola di scarico di pressione sul cilindro di azionamento del dispositivo di bloccaggio permette di togliere la pressione per rilasciare rapidamente il sacco dopo il riempimento. In *Figura 8-6a* è mostrato un disegno della macchina che indica i punti di controllo relativi agli input e agli output, e le assegnazioni di input/output (I/O) sono mostrate in *Figura 8-6/*n

Assegnazioni di input/output e considerazioni di cablaggio

Il numero di punti di I/O richiesti è uno dei parametri che devono essere noti per scegliere il controllore per una data applicazione. La *Figura 8-6b* mostra un totale di 16 punti: 8 output e 8 input. Per questa applicazione, un'unità Texas Instruments Modello 510, che ha 20 punti di I-, è risultata conveniente sotto il profilo tecnico ed economico. Dopo aver scelto i punti di verifica e di controllo, nonché il controllore da impiegare, occorre specificare i terminali di connessione per gli input e per gli output in modo da poter programmare il controllore e tracciare lo schema di cablaggio per il controllo della macchina. Poiché il programma di controllo non esiste ancora, quando si scelgono i punti di connessione I/O non occorre prenderlo in considerazione. Anche se il programma esistesse già, solitamente è più facile cambiare i punti di assegnazione di I/O nel programma che non le reali connessioni cablate nel controllore. Pertanto le assegnazioni di I/O in *Figura 8-6b* sono state fatte in modo da semplificare il cablaggio piuttosto che la logica di controllo.

Occorre verificare tutti gli input e gli output per determinarne i requisiti di tensione e di corrente per essere certi che quando i terminali di I/O sono collegati ai sensori e agli attuatori vi sia la corretta alimentazione elettrica.

a. Punti di controllo della macchina

Output

Y1	Innalza e abbassa il braccio inferiore
Y2	Innalza il braccio superiore
Y3	Controlla la depressione del braccio superiore
Y4	Abbassa il braccio inferiore
Y5	Controlla la depressione del braccio inferiore
Y6	Controlla il rullo di estrazione del sacco
Y7	Toglie pressione agli elementi di sostegno del sacco
Y8	Elementi di sostegno del sacco

Input

X9	Seleziona il controllo automatico
X10	Seleziona il controllo manuale
X11	Interruttore di rilevamento presenza sacco al punto di trasferimento
X12	Interruttore a pedale per controllo manuale
X13	Interruttore di rilevamento depressione al braccio superiore
X18	Interruttore di rilevamento di sacco in posizione
X19	Comando esterno di agganciamento sacco da un altro controllore
X20	Comando esterno di rilascio sacco da un altro controllore

b.Assegnazioni di I/O

Figura 8-6. Controllo di I/O del manipolatore di sacchi

Sviluppo del sistema di controllo

Dopo che una macchina è stata definita da specifiche di prestazioni e applicazione, può essere sviluppato il programma di controllo. Il primo passo consiste nel determinare la sequenza delle operazioni di macchina e nell'identificare gli appropriati punti di controllo di input e output per svolgere quella sequenza. Le sequenze generali di base per un funzionamento totalmente automatico e manuale sono indicate in *Figura 8-7.*

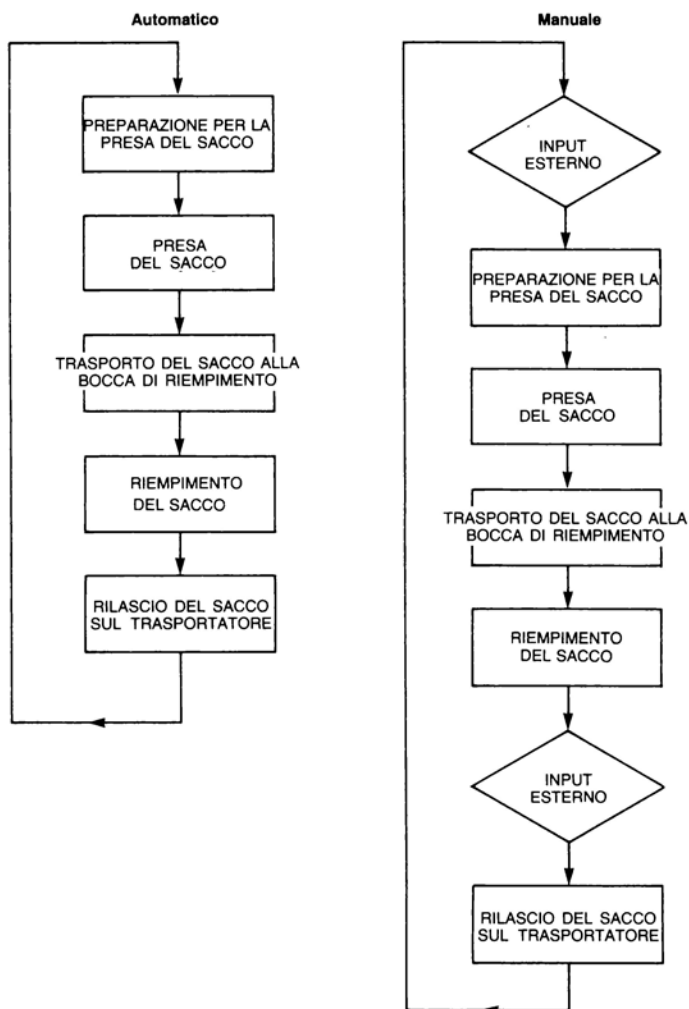



Figura 8-7. Diagramma di flusso semplificato

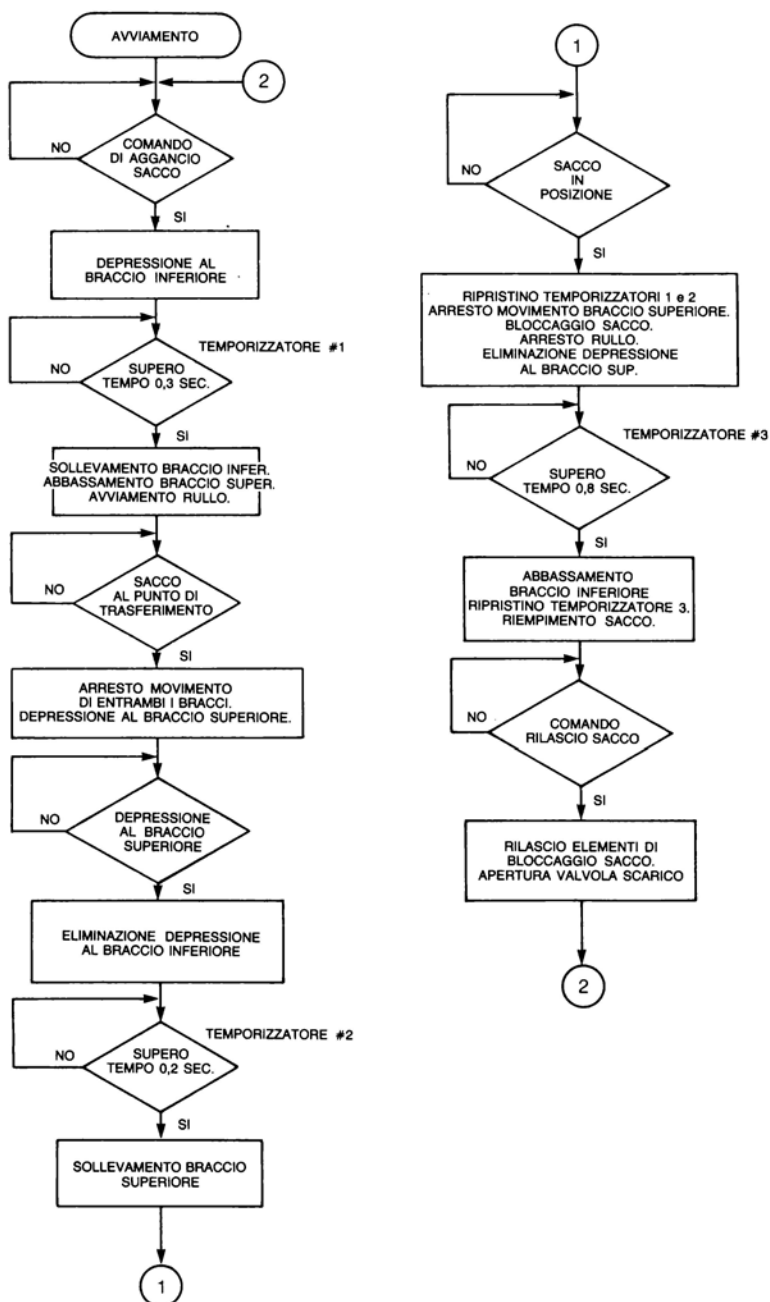



Figura 8-8. Diagramma di flusso del manipolatore di sacchi

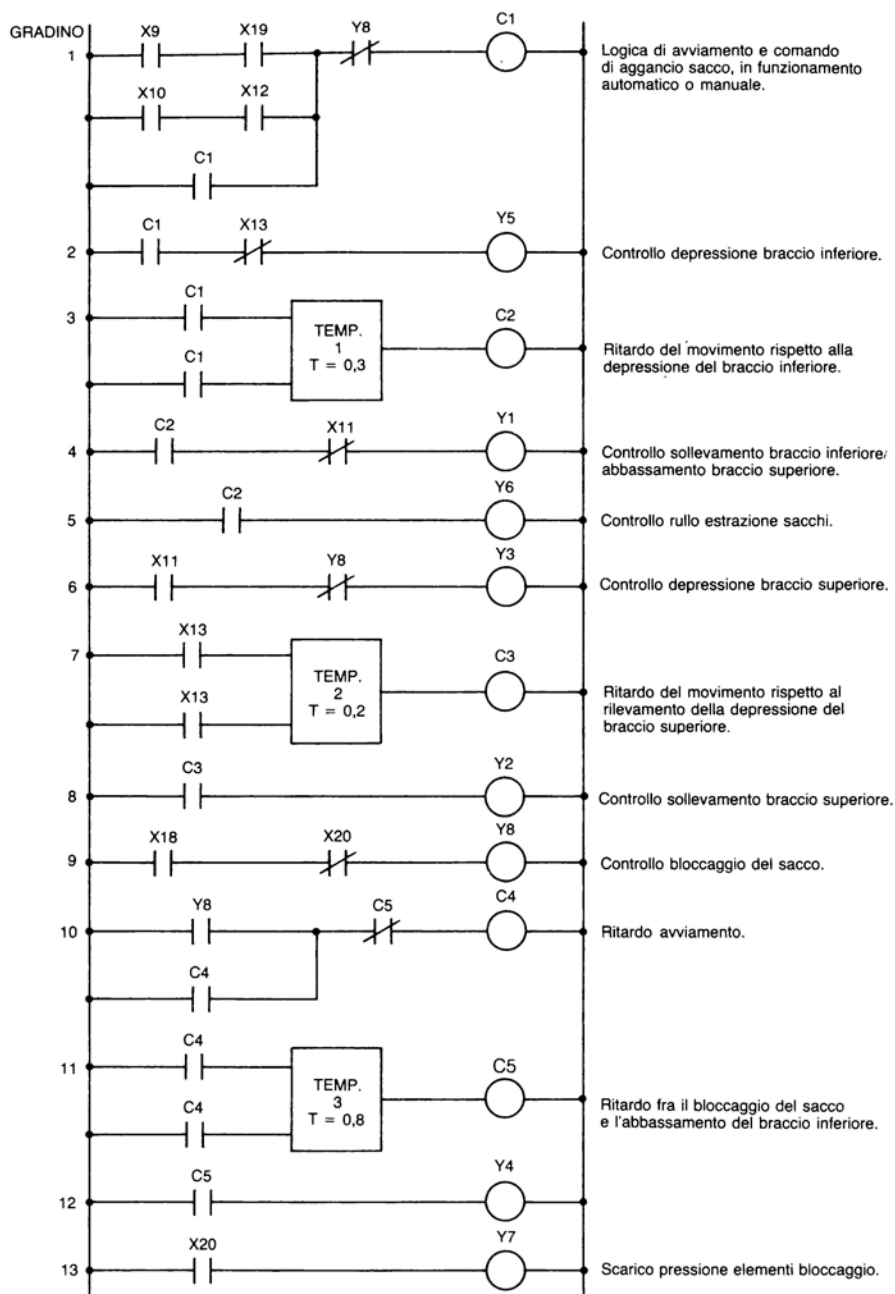



Figura 8-9. Logica a scala del controllore programmabile per il manipolatore di sacchi

Sviluppo del diagramma a scala

Il diagramma di flusso in *Figura 8-7* viene espanso in quello di *Figura 8-8* che ha un maggior numero di dettagli. Il diagramma logico a scala a relè in *Figura 8-9* è sviluppato in base al diagramma di flusso di *Figura 8-8*. Durante l'analisi di questo diagramma a scala, potrà essere utile fare riferimento alle *Figura 8-7* e *8-8*.

Nel gradino 1 verrà effettuata un'operazione automatica (X9) o manuale (X10), in funzione della scelta effettuata dall'operatore. Un comando di aggancio di sacco, proveniente da un altro controllore (X19) nel funzionamento automatico, o da un interruttore a pedale (X12) nel funzionamento manuale, eccità il relè di controllo C1 che si autoaggancia tramite il proprio input. Nel gradino 2, quando si chiude C1 viene attivata la depressione al braccio inferiore, tramite la valvola a solenoide Y5, per prelevare un sacco dalla pila di sacchi. Nel gradino 3, quando si chiude C1 viene fatto funzionare il temporizzatore 1 per 0,3 secondi.

C2 viene allora eccitato, e a sua volta eccita Y1 nel gradino 4. Y1 controlla la pressione dell'aria nell'attuatore a cilindro pneumatico che solleva il braccio inferiore per portare il sacco alla tramoggia di riempimento, e immette pressione nell'attuatore a cilindro pneumatico che abbassa il braccio superiore sino al punto di trasferimento del sacco. C2 inoltre eccita Y6 nel gradino 5 per azionare il motore del rullo di estrazione dei sacchi per far fuoriuscire il fondo del sacco dalla pila.

Quando il sacco raggiunge il punto di trasferimento, aziona un interruttore di rilevamento (X11) che apre Y1 per arrestare il movimento di entrambi i bracci. X11 viene mantenuto chiuso dal sacco sino a quando questo viene rilasciato. Nel gradino 6, quando X11 si chiude viene eccitato X3 per applicare depressione al braccio superiore, in modo che esso prenda il sacco. Questa depressione viene rilevata dall'interruttore X13 il cui contatto aperto nel gradino 2 disattiva Y5 per togliere depressione al braccio inferiore, in modo che esso rilasci il sacco. Nel gradino 7, i contatti chiusi di X13 avviano il temporizzatore 2, che conta 0,2 secondi e quindi eccita C3. Nel gradino 8, C3 eccita la valvola a solenoide Y2 per sollevare il braccio superiore. La forma a V della tramoggia di riempimento apre il sacco mentre il braccio superiore lo spinge attorno ad essa.

Quando il sacco è in posizione, come rilevato dall'interruttore X18 nel gradino 9, Y8 attiva il dispositivo di bloccaggio meccanico del sacco e rilascia C1 nel gradino 1 per ripristinare il temporizzatore 1, che diseccita Y6 nel gradino 5. Y8 inoltre rilascia Y3 nel gradino 6 per togliere depressione al braccio superiore; quando questa depressione è stata tolta, X13 si apre e ripristina il temporizzatore 2, che diseccita Y2 per arrestare il movimento verso l'alto del braccio superiore. Nel gradino 10, Y8 eccita C4 che si autoaggancia e fa partire il temporizzatore 3 nel gradino 11; questo conta 0,8 secondi ed eccita C5. Nel gradino 12, C5 eccita Y4 che immette pressione d'aria nel cilindro del braccio inferiore per abbassare il braccio per prendere un altro sacco. Nel gradino 10, C5 si apre per rilasciare C4 che ripristina il temporizzatore 3.

Una quantità premisurata di materiale viene immessa nel sacco dalla tramoggia di riempimento sotto il controllo di un altro controllore; questo stesso controllore emette poi un comando di rilascio di sacco (X20). Nel gradino 9, X20 si apre per rilasciare la valvola a solenoide Y8 del dispositivo di bloccaggio che sostiene il sacco, e simultaneamente eccita la valvola a solenoide Y7 nel gradino 13. Questa valvola apre uno scarico di pressione sul cilindro pneumatico del dispositivo di bloccaggio, cosicché il sacco viene rapidamente rilasciato e cade su un convogliatore. Il controllore del manipolatore di sacchi attende quindi il comando di presa del successivo sacco per ripetere il ciclo.

Programmazione del controllore

La logica per il primo gradino viene immessa nel controllore impostando sull'unità di programmazione manuale la seguente sequenza (queste istruzioni di programma sono state analizzate nel Capitolo 5):

STR X9 ENT
AND X19 ENT
OR X10 ENT
AND X12 ENT
OR C1 ENT
AND NOT Y8 ENT
OUT C1 ENT

dove ENT è il tasto di immissione che fa sì che l'istruzione venga immessa in memoria. I successivi gradini del diagramma a scala sono programmati in modo analogo, usando i comandi esposti nel Capitolo 5. Per esempio, il gradino 10 è:

STR Y8 ENT
OR C4 ENT
AND NOT C5 ENT
OUT C4 ENT

e il temporizzatore TMR 3 è:

STR C4 ENT
STR C4 ENT
TMR 3 ENT
48 ENT
OUT C5 ENT

Il numero da contare per TMR 3 è 48, poiché 48 per 16,67 millisecondi = 0,8 secondi, che è il ritardo di tempo richiesto per TMR 3. Potrà essere necessaria una certa correzione del programma per regolare esattamente i temporizzatori, ma la macchina sarà facilmente approntata per il funzionamento.

CONTROLLO DI UNA MACCHINA DI TAGLIO E FORATURA MEDIANTE UN CONTROLLORE PROGRAMMABILE

Anche per la lavorazione del legno viene usato il controllo automatico di macchine che debbano effettuare numerosi compiti ripetitivi. Un compito comune consiste nel taglio di un pezzo di legno in una lunghezza predeterminata e nella trapanatura di fori a ciascuna estremità per una profondità prestabilita. Questo processo richiede un'opportuna sequenza fra le operazioni di taglio e foratura per evitare interferenze reciproche e assicurare che la lavorazione sia fatta in modo sicuro e corretto. La sequenza delle operazioni può essere controllata con vari sistemi, fra cui quello a relè, quello meccanico e quello a controllore programmabile. Il controllore programmabile è risultato più economico e affidabile, e ha migliorato la sicurezza di funzionamento in ambiente polveroso riducendo i tempi di manutenzione; è anche risultato più flessibile, e ha fornito una miglior sicurezza per gli operatori.

Funzionamento della macchina

Il funzionamento della macchina di taglio e foratura di *Figura 2-4* è molto semplice. L'operatore inserisce nella macchina una tavola di legno e avvia la macchina premendo l'interruttore di avviamento. Anzitutto la tavola viene bloccata per impedire che possa spostarsi. La macchina quindi ne taglia contemporaneamente le estremità abbassando nel legno due seghe circolari fino a quando si chiudono degli interruttori limite al termine dello spostamento; la chiusura degli interruttori limite fa sì che le seghe vengano risollevate nella loro posizione di riposo. Quindi due trapani effettuano contemporaneamente due fori alle estremità della tavola ad una profondità prestabilita. I trapani, quando chiudono gli interruttori limite al termine del loro spostamento, vengono ritratti nella posizione di riposo. Quando tutte le operazioni sono finite, il dispositivo di bloccaggio rilascia la tavola, che può essere tolta dalla macchina.

Nell'esempio anzidetto, la tavola di legno viene inserita e tolta manualmente, ma queste operazioni potrebbero essere effettuate da un meccanismo di carico sotto il controllo dello stesso controllore programmabile. Un cilindro pneumatico viene usato per bloccare la tavola e dei cilindri idraulici sono usati per spostare le seghe e le punte da trapano; questi cilindri sono controllati da valvole a solenoide che, a loro volta, sono controllate dal controllore programmabile.

È richiesto un totale di 20 punti di input/output: 8 output per le seghe, i trapani e i dispositivi di bloccaggio, e 12 input per verificare la posizione degli interruttori limite e degli interruttori che sono azionati dall'operatore per selezionare i modi di funzionamento. La corretta velocità di funzionamento può essere facilmente ottenuta mediante il TI Modello 510, che è stato scelto come controllore programmabile. Le assegnazioni di I/O mostrate in *Figura 8-10* sono state usate per i collegamenti degli attuatori di output e degli interruttori di input e per la programmazione del controllore.

Output	
Y1	Bloccaggio
Y2	Avanzamento sega sinistra
Y3	Avanzamento sega destra
Y4	Arretramento di entrambe le seghe
Y5	Arretramento trapano sinistro
Y6	Avanzamento trapano sinistro
Y7	Arretramento trapano destro
Y8	Avanzamento trapano destro

Input	
X9	Interruttore di verifica perdita di pressione
X10	Sega destra/sinistra in posizione di riposo
X11	Sega sinistra avanti
X12	Sega destra avanti
X13	Trapano destro/sinistro in posizione di riposo
X14	Trapano sinistro avanti
X15	Trapano destro avanti
X16	Avviamento di ciclo
X17	Selezione trapano sinistro
X18	Selezione trapano destro
X19	Selezione sega sinistra
X20	Selezione sega destra

Figura 8-10. Assegnazioni di I/O per la macchina di taglio e foratura

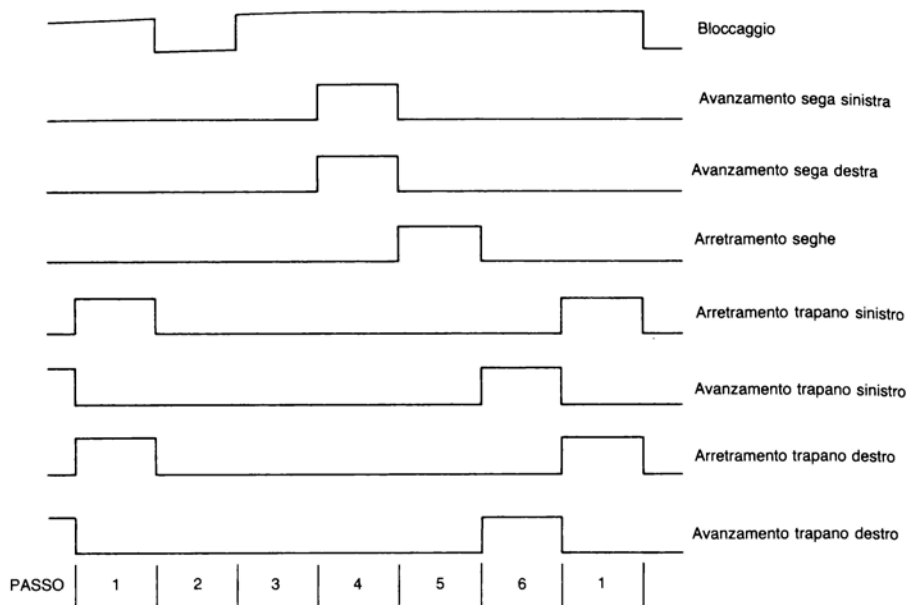



Figura 8-11. Diagramma di tempificazione di taglio e foratura

Controllo sequenziale con temporizzatore a tamburo

Poiché il funzionamento della macchina ripete continuamente la stessa sequenza di operazioni, uno dei modi più semplici per controllare la sequenza consiste nell'impiegare un temporizzatore a tamburo. Il controllore programmabile fornisce elettronicamente la funzione di temporizzatore a tamburo, cosicché non è necessario avere fisicamente un tamburo esterno. Il diagramma di temporizzazione che indica lo stato di ciascun output è mostrato in *Figura 8-11.*

Il diagramma di temporizzazione è suddiviso in passi, o fasi, ognuno dei quali produce un particolare gruppo di condizioni di output. Poiché vi sono sei condizioni particolari, il controllore deve avere sei stati particolari per mettere in sequenza opportunamente la macchina. Il temporizzatore standard a tamburo nel Modello 510 PC usato in questa applicazione ha quindici uscite particolari e sedici passi. Poiché sono necessari soltanto sei relè, quelli che non vengono usati possono essere programmati a 0 in modo che nessuna azione sia richiesta o effettuata quando il temporizzatore si sposta tra i passi sette e sedici.

La funzione del tamburo temporizzatore permette l'uso di quindici output logici che agiscono analogamente ai relè di controllo. Questi output di controllo sono combinati

TAMBURO 01 PREIMP. = 01 SCN./CONT = 01	C 0 1	C 0 2	C 0 3	C 0 4	C 0 5	C 0 6	C 0 7	C 0 8	C 0 9	C 1 0	C 1 1	C 1 2	C 1 3	C 1 4	C 1 5
PASSO CONT/ PASSO*															
1 00001	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
2 00001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3 00060	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4 00001	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5 00001	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
6 00001	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
7 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
8 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
10 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
11 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
12 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
13 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
14 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
15 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
16 00000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

*CONT/PASSO INDICA CHE GLI OUTPUT DELLA DURATA DI TEMPO SONO NELLO STATO PRESCRITTO PER CIASCUN PASSO

1 - INDICA CHE L'OUTPUT SARÀ ON DURANTE IL PASSO

0 - INDICA CHE L'OUTPUT SARÀ OFF

con gli input degli interruttori per fornire gli otto stati particolari mostrati nel diagramma di temporizzazione di *Figura 8-11* per ciascuno dei sei passi.
Inoltre, alcuni output dei relè di controllo sono usati per la sequenza di controllo passo a passo. La programmazione del temporizzatore a tamburo è mostrata in *Figura 8-12*; si noti che i relè di controllo da C12 a C15 (i numeri sono posti verticalmente) sono programmati per contare binariamente da 1 a 15. Combinando la logica di input e di output del controllore con questi output di controllo a relè, il temporizzatore a tamburo non avanzerà alla fase successiva sino a quando non saranno completate tutte le azioni previste.
Come risultato, la funzione del temporizzatore a tamburo determina una auto-sequenza del controllore. Si noti che il tempo di sosta in ciascun passo può essere controllato mediante conteggi-per-passo (CONT/PASSO in *Figura 8-12*) programmati nel controllore.

Logica a scala del temporizzatore a tamburo

Il diagramma logico a scala per le sequenze di stato è mostrato in *Figura 8-13*. Il primo gradino riguarda le linee di abilitazione e avanzamento del temporizzatore a tamburo,

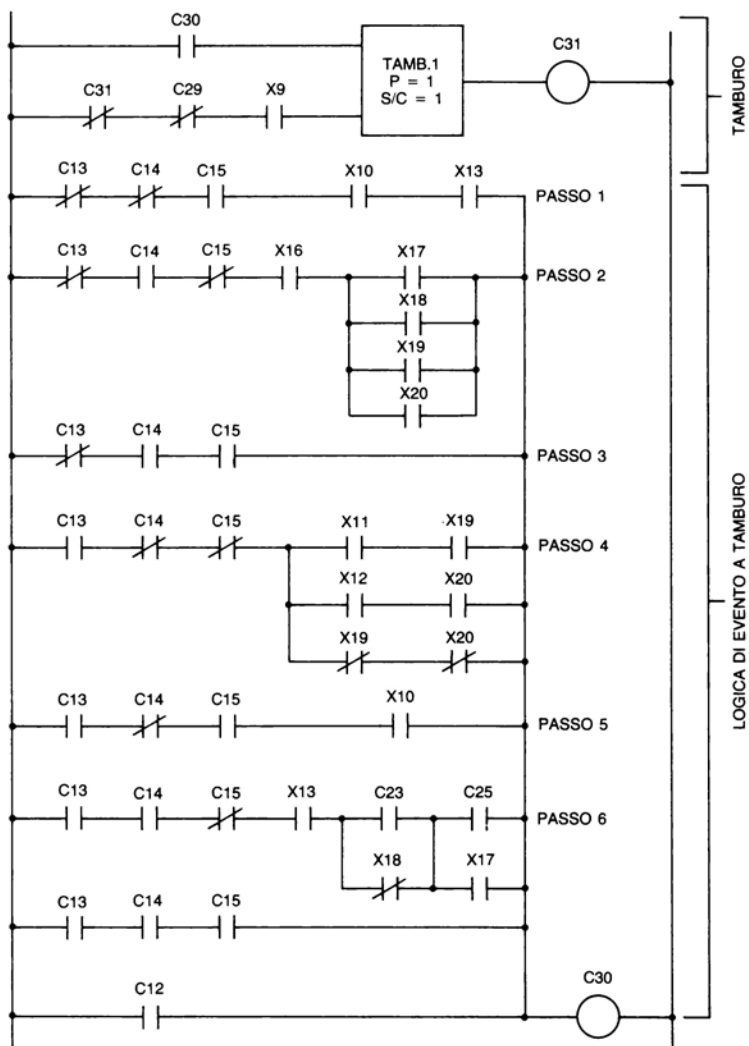



Figura 8-13. Logica a scala per temporizzatore a tamburo

e i gradini restanti impostano il controllo sequenziale del tamburo una volta che è in funzione. La prima linea del primo gradino indica che il tamburo viene controllato dal relè C30 che è l'output della logica di evento del tamburo (messa in sequenza di stato), questo permette l'uso della logica di evento per controllare il tamburo, poiché C30 è attivo soltanto quando si verificano correttamente tutte le condizioni di ciascun passo. La seconda linea del primo gradino indica le condizioni che consentiranno al tamburo di operare. Viene abilitata quando C31 (il relè di controllo del tamburo), C29 (il relè di controllo del tamburo), e X9 (l'interrutore di pressione di aria) indicano contemporaneamente che non vi sono condizioni di errore e perdite di pressione d'aria mentre il tamburo è in funzione; in caso contrario questo gradino riporterà il tamburo allo stato iniziale. Per specificare il tamburo in modo completo devono essere forniti il numero del tamburo, il suo stato preimpostato e il conteggio di passo (ognuno di questi è 01, come mostrato nell'angolo sinistro superiore di *Figura 8-12*).

Il programma per far svolgere al controllore Texas Instruments 510 la funzione logica del gradino di tamburo del diagramma a scala di *Figura 8-13* è il seguente:

STR NOT C31 ENT AND NOT C29 ENT AND X9 ENT OUT C31 ENT	Queste quattro linee impostano i parametri per C31, che è la linea di abilitazione di ripristino del temporizzatore a tamburo.
STR C30 ENT STR C31 ENT DRM 1 ENT 1 ENT 1ENT OUT C31 ENT	Questa sequenza imposta il temporizzatore a tamburo.

Logica a scala di evento a tamburo

La successiva sequenza della logica a scala di *Figura 8-13*, la logica di evento del tamburo, descrive il funzionamento del tamburo per fornire i passi e gli stati del diagramma di temporizzazione considerato in precedenza. In sintesi, il suo funzionamento è il seguente. Tutti gli input e gli output di passo sono inviati a un circuito OR per controllare C30, che è il relè di abilitazione di conteggio del tamburo; i «contatti» di C30 devono essere chiusi affinché il tamburo continui il conteggio. Da C12 a C15 vi sono i relè di controllo del tamburo, che vengono impostati in fuzione del conteggio di passo del tamburo stesso; poiché questi relè sono usati anche in ciascun passo della logica a scala, la logica restante in questo passo deve essere «soddisfatta» durante quel conteggio di passo affinché quel tamburo continui ad operare.
Nel primo passo della logica di evento a tamburo, X10 (indicante che le seghe sono in posizione di riposo) e X13 (indicante che le punte da trapano sono in posizione di riposo) devono essere chiusi prima che il temporizzatore si sposti al passo successivo. Queste condizioni sono incluse nel passo 1 per assicurare che le seghe e le punte siano completamente arretrate prima che la macchina possa avviarsi. Questa è una caratteristica di sicurezza per proteggere sia la macchina che l'operatore. Il passo 2

richiede che X16, l'interruttore di avviamento, venga attivato dall'operatore prima che il temporizzatore avanzi, altrimenti il temporizzatore rimarrà in attesa in questo gradino. Quando viene fornito il segnale di avviamento, viene verificato lo stato dei contatti da X17 e X20, che sono gli interruttori di operatore, per scegliere quali punte da trapano e quali seghe occorre azionare nel ciclo successivo. Se nessun interruttore è impostato, non è richiesta alcuna azione di macchina e il controllore si fermerà al passo 2; se ne viene impostato uno qualsiasi, il temporizzatore si muoverà al passo 3. Il passo 3 è semplicemente usato come un ritardo e non richiede alcuna logica esterna. Il conteggio di tempo del passo è impostato a 60, come mostrato in *Figura 8-12*, che corrisponde ad un ritardo di 0,2 secondi sul controllore Modello 510. Dopo questo ritardo il temporizzatore avanzerà al passo 4.
Il passo 4 del programma del temporizzatore a tamburo di *Figura 8-12* aziona i relè di controllo C1, C2 e C3, che attivano i morsetti di bloccaggio e le seghe. Le seghe ruotano e si spostano fino a raggiungere la posizione rilevata dagli interruttori limite mediante gli input X11 e X12, poi il temporizzatore avanza al passo 5. Nel passo 5, il relè di controllo C4 nel programma a tamburo attiva il meccanismo di sollevamento per riportare le seghe in posizione di riposo; quando le seghe sono completamente arretrate, l'interruttore limite chiude X10 e il temporizzatore si porta al passo 6.
Il passo 6 fa sì che le punte del trapano ruotino in base al comando dei relè C6 e C8 nel programma a tamburo. C6 controlla la punta di sinistra e C8 quella di destra. Il sequenziatore a tamburo si ferma nel passo 6 sino a quando le punte raggiungono le loro posizioni limite. Il resto del temporizzatore a tamburo non viene impiegato, cosicché esso si sposta dal passo 7 al passo 16 senza alcuna azione e ritorna al passo 1. Al passo 1 le punte da trapano sono riportate in posizione di riposo. Quindi il temporizzatore si porta al passo 2 per attendere l'azione dell'operatore per iniziare il ciclo successivo.

Logica a scala di output

La logica a scala per fornire gli output che azionano la macchina richiede soltanto otto gradini, come mostrato in *Figura 8-14*. Ciò fornisce un'indicazione delle capacità di un controllore programmabile con il dispositivo di sequenza a tamburo in un'applicazione di questo tipo.
Verrà ora analizzata questa logica secondo l'ordine delle assegnazioni degli attuatori di output. Y1, che è il dispositivo di bloccaggio ad azionamento pneumatico che trattiene in posizione la tavola di legno, è controllato soltanto da C1. Il programma del temporizzatore a tamburo di *Figura 8-12* mostra che il relè di controllo C1 è in ON durante l'intero ciclo dopo che l'interruttore di avviamento è stato azionato nel passo 2. Così, la tavola di legno viene bloccata prima che venga effettuata qualsiasi altra azione, e resta bloccata sino a quando i trapani si ritraggono nel passo 1. Y2, l'attuatore della sega di sinistra, sarà in ON soltanto nel passo 4 e soltanto se X19, l'interruttore di selezione della sega di sinistra, è in ON. Analogamente, l'attuatore della sega di destra, Y3, sarà in ON soltanto nella fase 4 e soltanto se X20, l'interruttore di selezione della sega di sinistra, è in ON. Y4, che fa sollevare entrambe le seghe, viene attivato da C4 nel passo 5, dopo che le seghe hanno completato l'azione prevista dal passo 4. Y6 e Y8 provocano l'avanzamento delle punte da trapano scelte da X17 e X18 rispettivamente quando C6 e C8 sono attivati nel passo 6, dopo aver fatto arretrare le seghe. Includendo Y5 e Y7 rispettivamente nella logica per Y6 e Y7 rispettivamente nella logica per Y6 e Y8, ci si assicura che l'attuatore per l'avanzamento del trapano sia

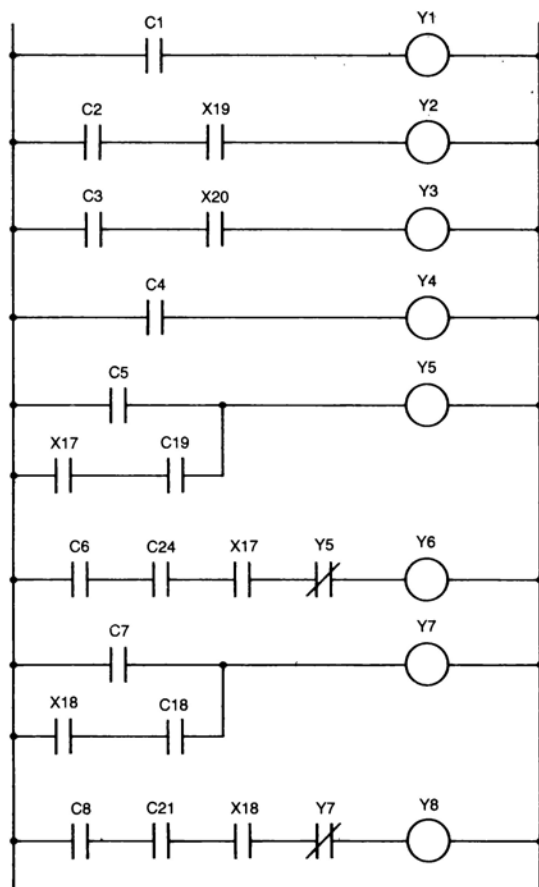



Figura 8-14. Logica a scala di output

eccitato soltanto se non è inserito l'attuatore per l'arretramento del trapano. Ciò impedisce che la macchina cerchi di far avanzare ed arretrare contemporaneamente il trapano, situazione che produrrebbe inutili sollecitazioni. Infine, Y5 e Y7, che sono gli attuatori per l'arretramento del trapano, sono attivi rispettivamente quando C5 e C7 sono inseriti nel passo 1 e quando l'interruttore limite è stato attivato come indicato rispettivamente da C19 e C18.

Logica a scala per il rilevamento di errori

La logica per il rilevamento degli errori determina se la macchina non sta funzionando correttamente. In questo caso tutti gli output vengono disattivati, onde prevenire danni all'attrezzatura. In alternativa si può programmare l'accensione di una lampada di errore per richiamare l'attenzione dell'operatore.

La logica di errore usata in questa macchina consiste nei quattro gradini di logica a relè mostrati in *Figura 8-15*. Il primo gradino mostra che quando i contatti normalmente chiusi C27 sono aperti, il relè di controllo principale RCP1 disattiva tutte le linee di output della macchina, e gli output di macchina rimangono disattivati sino a quando l'operatore corregge il problema ed avvia nuovamente la macchina. Nel secondo gradino, quando Y4 (entrambe le seghe sollevate), Y5 (trapano di sinistra arretrato) e Y7 (trapano di destra arretrato) sono contemporaneamente chiusi, un temporizzatore (TMR1) inizia un conteggio per un ritardo di tre secondi. Quando raggiunge lo 0, attiva un relè C28 di controllo di supero di tempo, che viene usato nel quarto gradino per la logica di arresto. Il terzo gradino verifica se vi sono funzionamenti scorretti negli interruttori limite dei trapani e delle seghe: se l'interruttore limite della posizione di riposo e l'interruttore limite della posizione estesa sono contemporaneamente chiusi, viene attivato C19. Nel quarto gradino se C28 è in ON C C29 è in ON, oppure se C28 è in ON e X9 (interruttore di rilevamento pressione) non è aperto, il relè di controllo C27 viene attivato e agganciato. Pertanto, quando il ciclo di macchina è completo, se sono state rilevate condizioni di errore, o se vi è una perdita di pressione di aria, il relè di controllo C27 viene agganciato in ON.

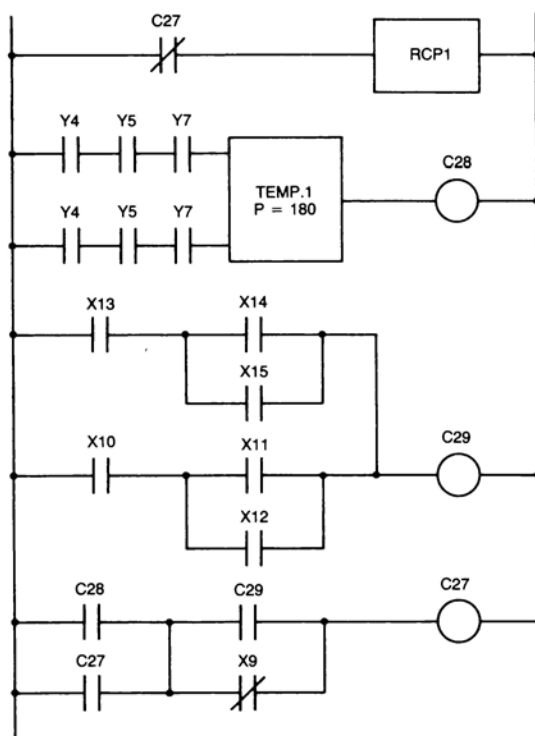



Figura 8-15.· Logica di rilevamento di errori

VALUTAZIONE DI UN CONTROLLORE PROGRAMMABILE

Quando si sceglie un controllore programmabile, è importante considerare un certo numero di caratteristiche. Solitamente queste caratteristiche sono specificate nella documentazione del fabbricante, tuttavia quando si confrontano delle specifiche occorre fare attenzione, poiché il loro significato può variare da un fabbricante ad un altro.

Tempo di scansione

Uno dei parametri più importanti per operazioni che sono critiche per quanto riguarda il tempo, è la velocità con la quale il controllore programmabile può eseguire la logica a scala del programma. Solitamente questo viene specificato come tempo di scansione per 1000 nodi di logica, e il campo nominale per gli attuali controllori è compreso fra 1 e 200 millisecondi. Tuttavia il significato di questo valore deve essere attentamente valutato per ogni particolare applicazione, poiché questo tempo non include il tempo effettivamente speso nelle routine di anello che sono associate con gli input e/o gli output. Queste routine, infatti, possono richiedere un considerevole tempo di esecuzione, e pertanto la velocità del controllore può essere molto inferiore al tempo di scansione calcolato in base ai dati delle specifiche.

Confronto fra funzionamento sincrono e funzionamento asincrono

I controllori programmabili si differenziano per il modo in cui trattano il rilevamento degli input e l'impostazione degli output (routine I/O) in relazione al tempo rispetto alla sequenza della logica a scala. Se le routine I/O si verificano in serie con la soluzione della sequenza logica a scala, il funzionamento è chiamato sincrono. Se le routine I/O e la sequenza attraverso la logica a scala sono indipendenti, il funzionamento è chiamato asincrono.
Può sembrare che il funzionamento asincrono sia più veloce e consenta una produzione superiore a quella del funzionamento sincrono, in funzione del modo in cui gli anelli operativi cooperano fra loro nel tempo. Tuttavia, in un sistema asincrono le condizioni di input possono variare in qualsiasi momento durante la scansione in sequenza, e ciò può costituire un problema. Si supponga, per esempio, che la stessa connessione di input sia usata in due punti in una scansione, uno all'inizio e l'altro alla fine. Se durante la scansione, l'input cambia, l'output per un dato ciclo non sarà uniforme, e ciò può dar luogo ad apparenti errori intermittenti di logica quando uno o più output possono avere un valore errato per un breve periodo. In alcuni controlli di macchina questo può essere un problema serio, specialmente se gli output agiscono rapidamente e possono rispondere rapidamente rispetto alla velocità del controllore. Quando si sceglie un controllore per un progetto, si dovrebbe considerare sia la produzione media sia la produzione nel caso peggiore.

Numero di input e output

Una caratteristica fondamentale per un controllore programmabile è il numero totale di input e di output collegabili. Il controllore usato dovrebbe avere un numero di I/0 sufficiente per l'applicazione prevista, con alcuni I/0 di riserva per consentire future

espansioni o miglioramenti. È anche interessante valutare se l'unità ha una capacità di espansione degli I/0; se unità di espansione I/0 possono essere aggiunte in modo efficiente e pratico, ciò permetterà di risparmiare nella progettazione dell'unità iniziale e consentirà una facile espansione se il sistema avrà necessità di espandersi.

Capacità elettrica di I/0

Ciascun input e output ha determinate caratteristiche di corrente o di tensione e queste caratteristiche devono essere confrontate con quelle del controllore, per essere certi che non vi siano incompatibilità. È possibile evitare un hardware esterno se il controllore può fornire una tensione e una corrente sufficienti per azionare direttamente un dispositivo di 1/0 senza richiedere circuiti o dispositivi di adattamento.

Memoria di utente

La quantità di memoria di utente necessaria dipende dalla lunghezza e dalla difficoltà delle operazioni logiche che devono essere risolte in una applicazione. Le applicazioni semplici con solo pochi relè di controllo non richiedono una significativa quantità di memoria, ma applicazioni più complicate richiederanno più memoria. Per determinare quanta memoria deve essere disponibile, è necessaria una valutazione della logica del programma. Inoltre è opportuno tenere presente che i programmi dei sistemi tendono ad espandersi dopo che il sistema è stato progettato, e pertanto la possibilità di aggiungere altra memoria solitamente risulterà vantaggiosa.

Funzioni matriciali

Le operazioni matriciali sono usate soprattutto per il rilevamento di errori, e consentono all'utente di confrontare un gruppo di condizioni, i cui output sono noti, con le reali condizioni di input e output della macchina per determinare se si è verificato un errore; in questo caso, può essere definita un'azione correttiva sulla base dei risultati del confronto. Questa caratteristica può ridurre il tempo di manutenzione segnalando all'operatore il problema e raccomandando l'azione correttiva da intraprendere.

Funzioni aritmetiche

A differenza della logica a relè, un controllore programmabile può effettuare funzioni aritmetiche che possono servire per impostare temporizzatori e modificare dati. Ciò aumenta la capacità del sistema di controllo e consente un miglior controllo della macchina.

Temporizzatori e contatori

Quando si impiega una logica a relè, i temporizzatori e i contatori devono essere realizzati con elementi di controllo separati, che aumentano la quantità di hardware e il costo del sistema. Con un controllore programmabile queste funzioni possono essere svolte dal programma (software) senza aumentare il costo del sistema; le funzioni del controllore programmabile sono inoltre più accurate e sono limitate in numero soltanto dalla memoria disponibile per il programma.

Hardware di supporto per lo sviluppo del programma

La logica di programmazione a scala è molto semplificata se può essere visualizzata mentre viene sviluppata e se può essere cambiata facilmente quando aumentano i controlli. I display a raggi catodici e le unità di memorizzazione a dischi, disponibili per alcuni controllori, soddisfano questi requisiti. Alcuni controllori hanno anche unità audio con cassette a nastro e terminali dalle dimensioni di calcolatrici tascabili. È anche importante avere una copia su carta del programma per consentire un'opportuna documentazione, e pertanto di solito sull'unità di programmazione è necessaria un'interfaccia per stampante.
Un'altra caratteristica molto importante è la disponibilità di un valido servizio di manutenzione e riparazione e di ausili per lo sviluppo del software. Anche se il funzionamento del controllore soddisfa i requisiti dell'applicazione, può risultare scarsamente utile se non è disponibile il corretto supporto di sviluppo o un buon servizio di riparazione.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. Le operazioni di fabbricazione di tipo discreto che richiedono che un'operazione sia ripetuta più volte con una certa frequenza sono particolarmente adatte per essere controllate da un controllore programmabile.
2. La programmazione di un controllore programmabile risulta più facile se viene prima sviluppato un diagramma a scala.
3. Uno schema logico a relè può essere convertito in un diagramma a scala.
4. Un controllore programmabile rileva anzitutto le condizioni di input, poi usa queste condizioni per risolvere equazioni logiche programmate nella sua memoria, ed infine emette output determinati in base ai risultati delle equazioni logiche.
5. I diagrammi di flusso sono molto utili per la programmazione di un controllore programmabile.
6. Ciascun gradino di un diagramma a scala può essere separatamente programmato nel controllore programmabile.
7. I controllori programmabili hanno capacità di conteggio e di temporizzazione, e possono anche simulare la funzione di un temporizzatore a tamburo.
8. I controllori programmabili possono avere entro di sé una logica programmata per il rilevamento di errori.
9. Importanti caratteristiche dei controllori programmabili, che dovrebbero essere considerate al momento della scelta, sono:
   a. Tempo di scansione.
   b. Funzionamento sincrono/asincrono.
   c. Numero di input/output disponibili e possibilità di espansione.
   d. Caratteristiche elettriche degli input e degli output.
   e. Dimensioni della memoria e capacità di espansione.
   f. Funzioni matriciali.
   g. Supporto per lo sviluppo di programma predisposto dal fabbricante.
   h. Servizio di manutenzione e riparazione predisposto dal fabbricante.

Quiz per il Capitolo 8

1. I controllori programmabili:
   a. sono programmati usando una logica a scala di tipo a relè.
   b. non possono effettuare funzioni diverse da quelle della logica a relè.
   c. sono poco efficienti per i controlli industriali e hanno un uso limitato.
   d. sono ampiamente utilizzati in vari tipi di industrie.
   e. «a» e «d» sopra.

2. I controllori programmabili sono composti di:
   a. moduli di input.
   b. sequenziatori di controllo.
   c. memorie a scala.
   d. moduli di output.
   e. tutto quanto sopra.

3. La logica a scala a relè è usata nei controllori programmabili poiché:
   a. è il miglior linguaggio di controllo industriale che sia mai stato sviluppato.
   b. è impossibile scrivere un programma di controllo per una macchina secondo un'altra logica.
   c. la maggior parte delle persone addette al controllo industriale conosce già i diagrammi logici di quel tipo, e pertanto il loro impiego è facilitato.
   d. un comitato internazionale ha scelto la logica a relè come logica standard per il controllo industriale.
   e. nulla di quanto sopra.
   f. tutto quanto sopra.

4. Al giorno d'oggi i controllori programmabili:
   a. sono relativamente poco costosi rispetto alle attrezzature digitali originariamente disponibili per il controllo industriale.
   b. sono più potenti dei primi controllori introdotti sul mercato.
   c. possono essere economicamente convenienti anche quando sostituiscono soltanto pochi relè.
   d. nulla di quanto sopra.
   e. tutto quanto sopra.

5. Una caratteristica di un controllore programmabile per controllo industriale è che:
   a. ha una durata di funzionamento lunga e affidabile al confronto di una logica a relè.
   b. è molto difficile da capire da parte di un programmatore con poca esperienza.
   c. è poco affidabile poiché non vi sono parti in movimento.
   d. nulla di quanto sopra.

6. Un controllore programmabile:
   a. può essere usato su più di una macchina durante la sua vita applicativa.
   b. può essere riprogrammato sul luogo di lavoro.
   c. richiede un considerevole addestramento per poter essere usato.
   d. «a» e «b» sopra.
   e. nulla di quanto sopra.

7. Nel funzionamento di un controllore programmabile:
a. tutti gli stati logici sono mantenuti in memoria.
b. non possono essere effettuate operazioni matematiche.
c. ogni aggancio di dati deve essere effettuato utilizzando un relè di aggancio esterno.
d. tutto quanto sopra.
e. nulla di quanto sopra.

8. Un controllore programmabile:
a. consente una rapida verifica del funzionamento della macchina.
b. è più facile da riparare di una logica standard a relè.
c. tutto quanto sopra.
d. nulla di quanto sopra.

9. Un gradino di scala in un programma per controllore:
a. deve contenere almeno un output.
b. può contenere entrate AND, OR, NOT.
c. è continuamente scansionato per emettere o togliere l'appropriato output.
d. tutto quanto sopra.
e. nulla di quanto sopra.

10. I due tipi di relè in un controllore programmabile sono:
a. il relè di output e il relè di controllo.
b. il relè di controllo e il relè autoagganciante.
c. il relè autoagganciante e il relè non autoagganciante.
d. nulla di quanto sopra.

CAPITOLO 9

UNA NUOVA DIMENSIONE – I ROBOT

IN QUESTO CAPITOLO

Un nuovo importante strumento per aumentare la produttività per mezzo del controllo elettronico dei sistemi di automazione è il robot. Il robot ha le caratteristiche per migliorare, o persino rendere possibile, l'automazione di certe operazioni di produzione e assemblaggio. Tuttavia esso probabilmente non esisterebbe neppure se non fosse per il controllo elettronico. L'impiego dei robot nelle applicazioni industriali è stato analizzato nel Capitolo 1, e questo confronto ha dimostrato che nell'impiego produttivo dei robot gli USA sono indietro rispetto ad altri paesi (particolarmente rispetto al Giappone). Tuttavia negli Stati Uniti l'interesse per i robot ora si è acuito, e lo sviluppo di robot più piccoli, meno costosi, con movimenti più complessi e sistemi di visione sta permettendo applicazioni che sino a poco tempo fa non erano possibili. Questo capitolo definisce cosa sono i robot, ne descrive vari tipi e analizza i vantaggi che sono in grado di apportare.

COSA È UN ROBOT?

La menzione dei robot normalmente suggerisce visioni di personaggi come i droidi R2-D2 e C-3PO del film GUERRE STELLARI. In realtà R2-D2 e C-3PO appartengono a classi specializzate di robot, ma non sono il tipo attualmente impiegato in applicazioni industriali.
Una delle definizioni di "robot" fornita da un dizionario è così ampia che include anche l'apertura automatica di una porta di un garage, la lavastoviglie elettrica o il frigorifero. Tuttavia, il Robot Institute of America ha una definizione più raffinata:
"Un robot è un manipolatore riprogrammabile a funzioni multiple previsto per spostare materiali, parti, utensili o dispositivi specializzati mediante movimenti programmati e variabili per effettuare una molteplicità di compiti".
Anzitutto un robot deve essere programmabile, cioè deve essere possibile comunicargli cosa fare in una varietà di circostanze che possono presentarsi, e deve inoltre poter essere riprogrammato per svolgere un compito differente (questo esclude il dispositivo di apertura della porta del garage). In secondo luogo, un robot deve essere in grado di effettuare più di un compito, deve cioè essere multifunzionale (questo elimina la

lavastoviglie). Infine deve essere un manipolatore, cioè deve usare la sua forza per spostare un oggetto da un punto all'altro o lungo un determinato percorso passo a passo secondo le istruzioni di un programma (questo elimina il frigorifero).

CATEGORIE DI ROBOT INDUSTRIALI

Le due categorie principali di robot industriali sono il manipolatore di presa e collocamento e il robot intelligente.

Manipolatore di presa e collocamento

Il manipolatore di presa e collocamento è un dispositivo di tecnologia bassa o media in grado di effettuare un'operazione da punto a punto. La *Figura 9-1* mostra un tipico robot di presa e collocamento. Questo particolare robot ha tre assi di movimento, poiché può muoversi nel piano verticale, nel piano orizzontale, e può ruotare il dispositivo di presa. Pertanto il termine "asse di movimento" si riferisce al numero di modi in cui il robot può muoversi. Altri due assi di movimento sono disponibili come opzioni. Il massimo carico sostenibile da questo tipo di robot è 750 grammi (incluso il dispositivo di presa).
I robot di presa e collocamento sono usati soprattutto nell'assemblaggio e nel trasferimento di piccole parti, e in stazioni che alimentano materiali a un processo. Questi robot sono in grado di collocare oggetti in modo ripetitivo e con una buona precisione (la precisione del Seiko 200 è ± 0,01 millimetri), sono molto affidabili e possono essere riutilizzati per diverse applicazioni. Il controllo della sequenza di programma per il Seiko 200 è realizzato con un controllore programmabile 5TI o TI510.

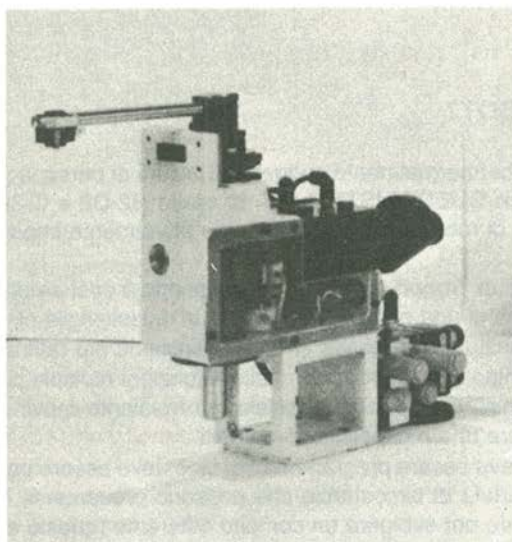



Figura 9-1. Un tipico robot di presa e collocamento

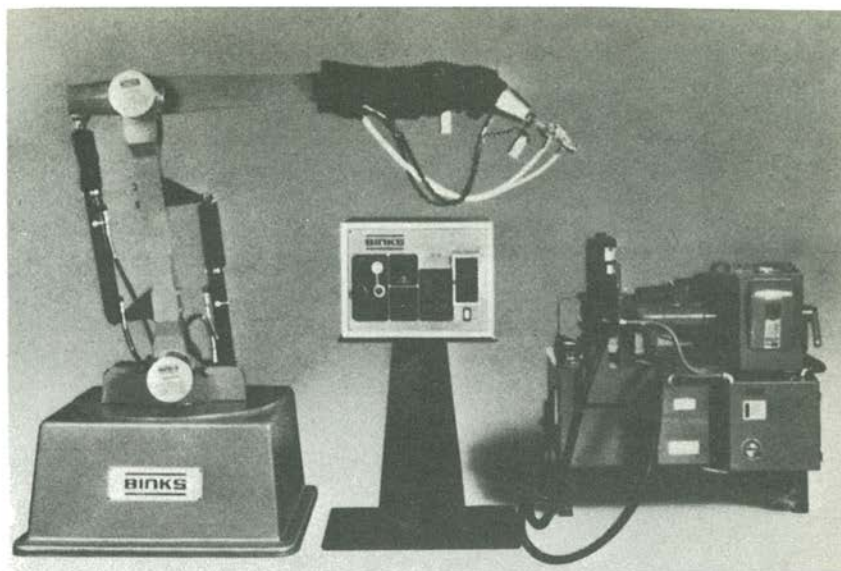



Figura 9-2. Un robot intelligente di media tecnologia (Per concessione della Binks Manufacturing Company)

Robot intelligenti

I robot intelligenti hanno una memoria, e alcuni modelli sono in grado di prendere decisioni in modo indipendente. Questi robot sono considerati dispositivi a media o alta tecnologia, a seconda del loro livello di intelligenza.

Robot a media tecnologia

Il robot mostrato in *Figura 9-2* è un esempio di robot intelligente a media tecnologia usato per operazioni di verniciatura a spruzzo. Un esperto verniciatore fa anzitutto compiere al robot i movimenti richiesti e questi movimenti vengono registrati, solitamente su una cassetta a nastro magnetico, per l'uso futuro. Questo viene definito come "istruzione" del robot mediante spostamento manuale. Quando l'istruzione è stata completata, il nastro viene letto e il robot riproduce ripetutamente questi movimenti. Lo spruzzatore montato sul robot ha una massima velocità di 170 centimetri/secondo, e può verniciare oggetti con altezza sino a 205 centimetri e con profondità sino a 91 centimetri. Questo particolare robot ha sei assi di movimento.

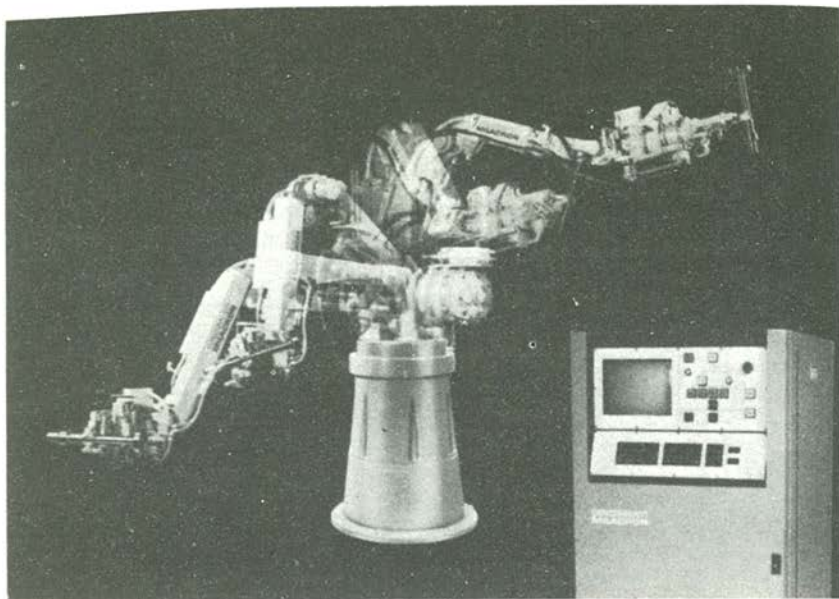



Figura 9-3. Robot ad alta tecnologia (Per concessione della Cincinnati Milacron)

Robot ad alta tecnologia

I robot ad alta tecnologia hanno capacità decisionali molto sofisticate e sono in grado di svolgere compiti complessi. La *Figura 9-3* mostra un esempio di robot che può essere classificato ad alta tecnologia. Questo robot è in grado di manipolare pezzi con un peso sino a 45 chilogrammi con un'accuratezza di ± 1,27 millimetri per asse. Ha sei assi di movimento e può raggiungere la velocità di 127 centimetri al secondo. Ha un sofisticato controllo a calcolatore che gli consente di saltare a differenti aree di un programma in modo da poter omettere, cambiare o aggiungere parti della sua sequenza "standard" di operazioni. Il suo volume di lavoro è di 28,3 metri cubi. Alcuni esempi di impiego di un tale robot ad alta tecnologia sono forniti qui di seguito.

Saldatura: una testa di saldatura da 45 chilogrammi salda carrozzerie di auto che si spostano lungo una linea di montaggio a velocità variabili che possono raggiungere i 25 centimetri al secondo. La linea di montaggio può rallentare o fermarsi, e il robot è in grado di tener conto di questo e continuare la saldatura. Può saldare 15 tipi differenti di carrozzerie che appaiono senza ordine predeterminato sulla linea di montaggio.

Caricamento di una macchina CNC: un robot opportunamente attrezzato carica 145 chilogrammi di elettrodi di grafite in un tornio CNC, quindi li trasferisce ad un secondo tornio CNC di filettatura e ad un trapano CNC. Infine fa ruotare le parti finite e le porta alla stazione di uscita.

Manipolazione di parti: il robot solleva carrozzerie di automobili dalla linea di montaggio, le ruota e le appende ad un convogliatore alto 2,8 metri.

CARATTERISTICHE DEI ROBOT

I robot intelligenti hanno sei elementi fondamentali in base ai quali possono essere classificati: la struttura, il meccanismo di azionamento, l'effettore terminale, il controllore, il sistema di istruzione e i sensori.

Struttura

Il corpo del robot può essere costruito in due forme: polare o cilindrica.

Struttura polare

Nella configurazione polare, mostrata in *Figura 9-4*, il corpo dei robot può ruotare verticalmente, orizzontalmente o in entrambi i sensi. Il braccio del robot, che si estende radialmente dal corpo, può essere fatto avanzare e arretrare, e il polso può essere mobile oppure no. La caratteristica fondamentale è che il corpo può ruotare in uno o due piani e il braccio può spostarsi in modo radiale.

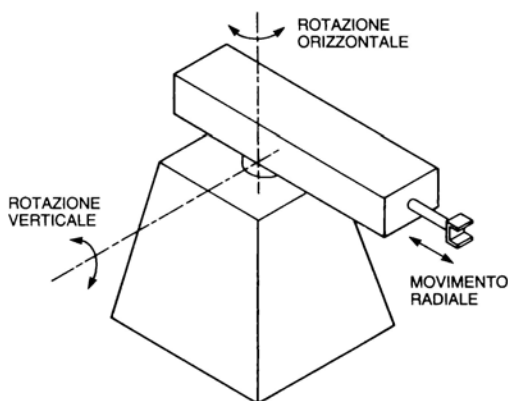



Figura 9-4. Struttura polare per un robot

In *Figura 9-5* è mostrato un esempio di robot con struttura polare; questo robot può ruotare di 200° nel piano orizzontale e il braccio può estendersi di 45 centimetri; è controllato da un microprocessore e viene usato soprattutto per manipolare, alimentare o accoppiare parti leggere. Anche dei grossi robot possono avere la configurazione polare e in *Figura 9-6* è mostrata un'unità di questo tipo che viene ampiamente utilizzata per il trasferimento di materiali.

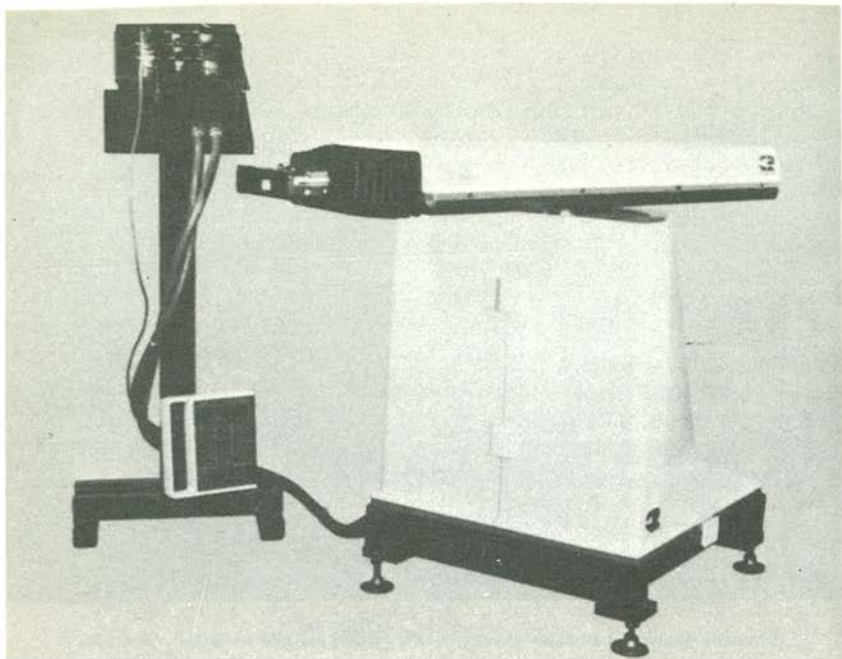



Figura 9-5. Robot a struttura polare (Per concessione della Copperweld Robotics)

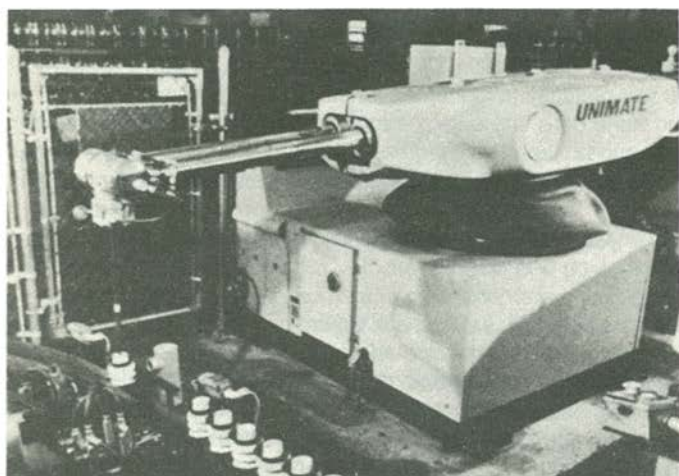



Figura 9-6. Grande robot a struttura polare (Per concessione della Unimation Inc., Danbury, CT)

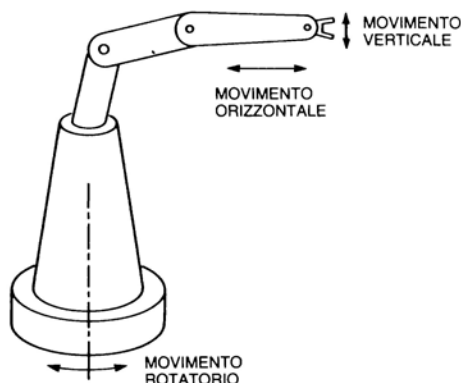



Figura 9-7. Struttura cilindrica per un robot

Struttura cilindrica

Nella struttura mostrata in *Figura 9-7* il corpo è costituito da un cilindro da cui si estende un braccio. Di norma il corpo può ruotare nel piano orizzontale, mentre il braccio sovente può muoversi sia nel piano orizzontale che in quello verticale.
Il robot intelligente mostrato in *Figura 9-8* ha una struttura cilindrica. Questa unità può sollevare fino a 100 chilogrammi e può ruotare di 240°; il suo braccio può estendersi di 285 centimetri in verticale e di 188 centimetri in orizzontale.
Il tipo di struttura solitamente determina il tipo di sistema di coordinate usato per descrivere i movimenti del robot. Nella configurazione polare vengono specificati un angolo e una distanza radiale. Nella configurazione cilindrica la descrizione del movimento del braccio viene fatta usando coordinate cartesiane, x, y, z.

Assi di movimento

La maggior parte dei robot è progettata per cercare di muoversi e fare le stesse cose che vengono fatte dalle persone. Come mostrato in *Figura 9-9*, il robot di tipo cilindrico ha una struttura dotata di una libertà di movimenti simile a quella della vita, delle spalle, dei gomiti, del polso e delle dita dell'uomo. Alcuni robot hanno sino a sei assi di movimento, come menzionato in precedenza.

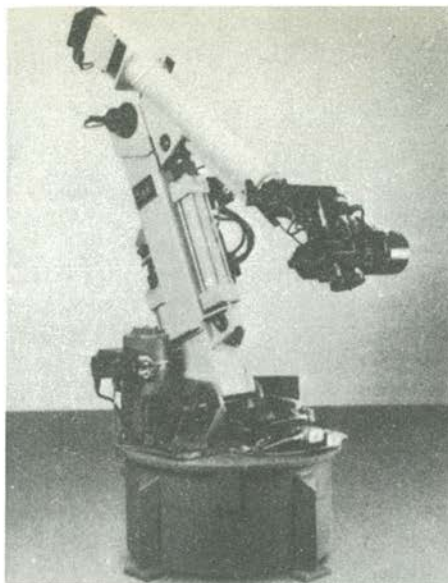



Figura 9-8. Robot di tipo cilindrico (Per concessione della MTS System Corporation)

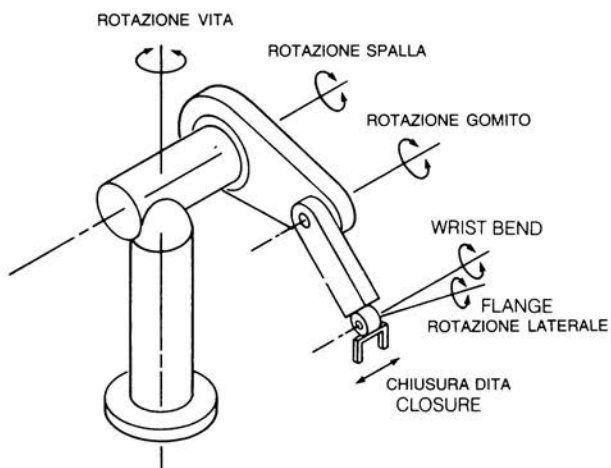



Figura 9-9. Assi di movimento per robot di tipo cilindrico

Meccanismo di azionamento

La sorgente di energia che aziona il manipolatore (braccio) del robot solitamente è di tipo neumatico, idraulico o elettrico. L'azionamento pneumatico è il meno costoso da acquistare, ma è anche il più limitato per quanto riguarda il peso che può manipolare. Gli azionamenti elettrici sono i più costosi, ma possono manipolare carichi elevati con circuiti di azionamento relativamente economici. Gli azionamenti idraulici sono intermedi fra quelli penumatici e quelli elettrici per quanto riguarda il costo e la capacità di carico. I grandi robot sono quasi sempre ad azionamento elettrico e richiedono una notevole energia; il robot di *Figura 9-3*, per esempio, richiede 22 KVA a 230 o 460 V in corrente alternata. Alcuni robot di presa e collocamento, come quello mostrato in *Figura 9-1*, usano degli azionamenti meccanici. Il robot in *Figura 9-5* ha un meccanismo di azionamento pneumatico; quello di *Figura 9-8* ha un azionamento idraulico e richiede 3 KVA a 460 V in corrente alternata.
I meccanismi di azionamento possono essere servocontrollati oppure no. Un robot servocontrollato può essere programmato per accelerare, decelerare o potersi arrestare in qualunque punto del suo normale campo di movimento. Le unità mostrate nelle *Figure 9-3* e *9-8* sono servocontrollate.
I robot non servocontrollati si arrestano in punti fissi di ogni asse. Il robot mostrato in *Figura 9-5* ha meccanismi di azionamento che non sono servocontrollati e ha due arresti fissi (che possono essere regolati inizialmente) su ciascun asse di movimento. Questo tipo di robot possiede certamente meno flessibilità di programmazione e di applicazione, ma è semplice da usare e meno costoso da acquistare e far funzionare. Questi fattori costituiscono un pregio significativo quando si sceglie un robot. Avere un robot con numerose prestazioni di tipo avanzato può essere di grande effetto, ma se queste prestazioni non sono necessarie per l'applicazione e restano utilizzate quando il robot è installato, vi è stato uno spreco di denaro.

Effettore terminale

L'effettore terminale è la "mano" del robot, cioè il dispositivo che manipola i carichi. È disponibile una grande varietà di effettori di tipo standard, e molti altri possono essere progettati appositamente per una particolare applicazione. Come mostrato in *Figura 9-10*, l'effettore può essere un meccanismo per afferrare un carico o un utensile (spruzzatore di vernice, dispositivo di saldatura, ecc.).

Velocità

La velocità è riferita alla punta o centro dell'effettore terminale. Se l'effettore deve muoversi per una lunga distanza fra i punti di azione, come nelle operazioni di carico pallettizzato, la velocità è un elemento di primaria importanza per la produttività del robot. Altre applicazioni, come la saldatura a punti, richiedono soltanto dei piccoli movimenti fra un punto e l'altro e in questo caso la velocità ha una scarsa influenza sulla produttività. La maggior parte dei robot ha velocità comprese fra 75 e 125 centimetri al secondo, ma alcuni sono molto veloci, come il Westinghouse della serie 6000 che può muoversi sino alla velocità di 2,5 metri al secondo.

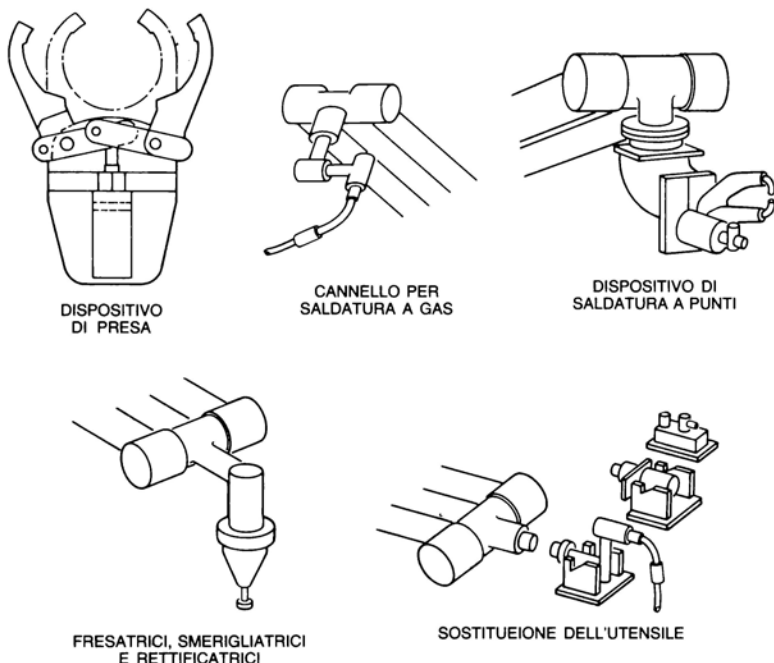



Figura 9-10. Assortimento di dispositivi di presa e utensili per robot

Controllore

Il cuore del robot intelligente è il controllore. Questo può essere un'unità programmabile molto semplice (con poca intelligenza) come il 5TI, o un sofisticato minicalcolatore come il TI990/12 mostrato in *Figura 9-11*. Numerosi robot ad alta tecnologia recentemente introdotti sul mercato utilizzano questo tipo di minicalcolatore, e sono in grado di effettuare operazioni molto complesse. In particolare, i sistemi di visione dei robot sono realizzabili soltanto impiegando dei controllori a minicalcolatore.
I controllori a tecnologia intermedia sono essenzialmente dispositivi CNC come quelli analizzati nel Capitolo 7.
La *Figura 9-12* mostra un robot azionato da un dispositivo CNC, con il controllore situato nel rack visibile a destra in fotografia. La maggior parte dei controllori a calcolatore è situata lontano dal robot; ciò è dovuto non solo alle dimensioni ma anche all'ambiente gravoso in cui sovente operano i robot (calore, polveri, ecc.).

Sistema di istruzione

In pratica esistono due metodi per insegnare al robot che cosa deve fare. Il primo è il metodo a "spostamento manuale" (walk-through) in cui il braccio del robot viene fisicamente mosso attraverso la serie di operazioni passo a passo che esso dovrà compiere, e i movimenti sono registrati su nastro o disco magnetico. Questo metodo è rapido e non richiede alcuna correzione del programma, tuttavia può essere necessario dover far compiere le operazioni al robot varie volte prima di raggiungere un funzionamento soddisfacente in base alla lettura del nastro. Inoltre, i grandi robot sono difficili da muovere e devono essere disponibili dei mezzi per indicare azioni quale la chiusura di un dispositivo di presa.
Il secondo metodo di istruzione è la predisposizione di un programma a software. Per semplici robot che usano unità di controllo come il TI510, la programmazione è basata su un diagramma a scala con logica a relè. In molti casi i sistemi CNC (per esempio quello di *Figura 9-12*) impiegano il linguaggio APT. Sistemi sofisticati che impiegano minicalcolatori come il TI990/12 si basano su un tipo di software con linguaggio FORTRAN, PASCAL, PL/1 o con termini in lingua inglese.

Linguaggi di programmazione

Tutti i principali fabbricanti di robot hanno sviluppato dei linguaggi di programmazione specializzati per i loro robot. La maggior parte dei linguaggi disponibili è del tipo da punto a punto, in cui l'utente immagazzina una serie di punti che guidano il robot attraverso una sequenza di operazioni. Altri linguaggi sono a livello di movimento

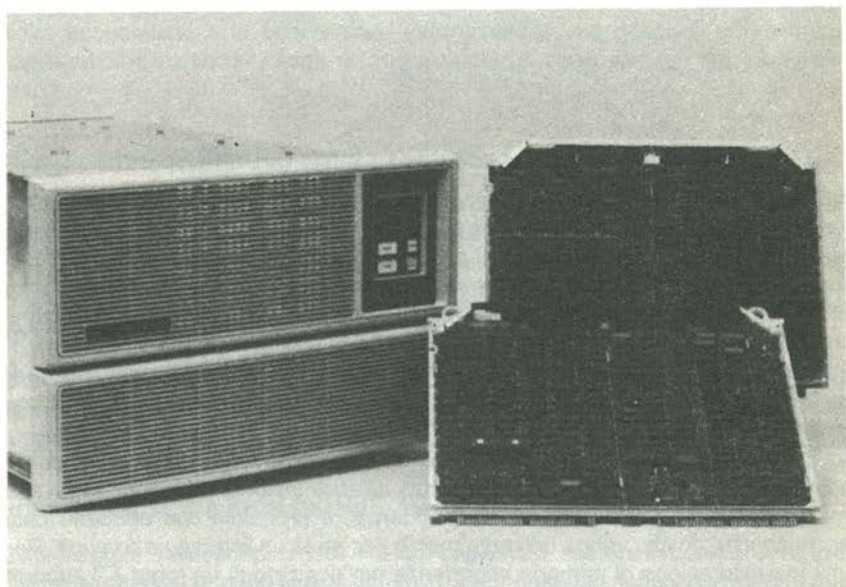



Figura 9-11. Minicalcolatore TI990/12

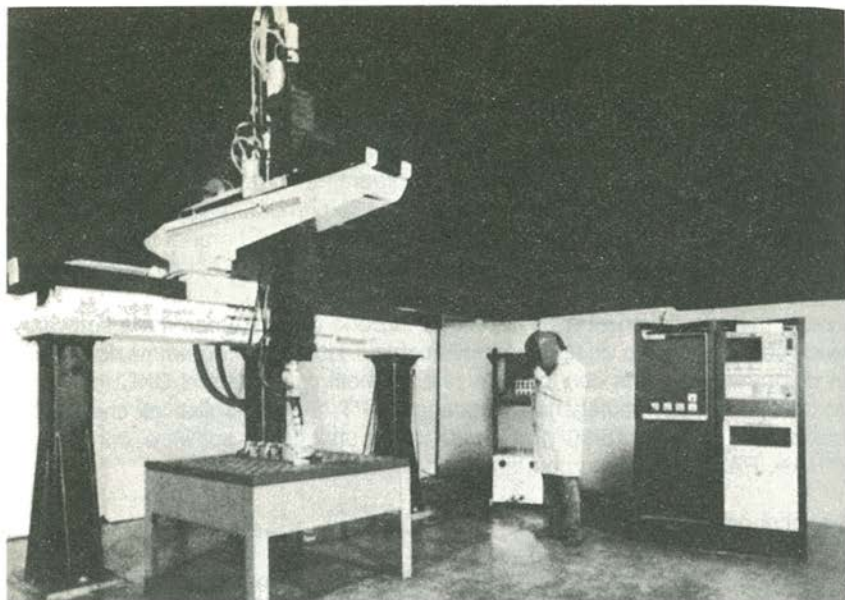



Figura 9-12. Controllore collocato lontano dal robot (Per concessione della Westinghouse Electric Corporation)

primitivo, un livello che consente semplici salti, richiami di subroutine e capacità di rilevamento. Esistono pochi linguaggi a livello di programma strutturato che consentono calcoli complessi come trasformazioni di coordinate e che possono consentire l'uso di sistemi di visione. La IBM sta sviluppando un linguaggio specializzato con istruzioni simili alla lingua inglese, come "pick up object 1" e "place on object 2" che comandano alla macchina di prendere l'oggetto 1 e di collocarlo sull'oggetto 2.

I linguaggi usati per programmare i robot sono difficili da capire senza uno speciale addestramento; pertanto in questo libro non sono inclusi specifici esempi di programmazione per i robot.

Sono in corso dei tentativi per sviluppare un linguaggio universale per robot, ma i fabbricanti solitamente oppongono resistenza all'accettazione di un linguaggio sostanzialmente differente dal proprio. Di conseguenza, è probabile che debbano passare parecchi anni prima che venga universalmente accettato un linguaggio comune. Pertanto, una considerazione di primaria importanza nell'acquisto di un robot è il supporto di insegnamento offerto dal fabbricante. È sufficiente per consentire la realizzazione dell'applicazione? È facile da usare?

Sensori

I robot che devono svolgere determinati compiti hanno la necessità di rilevare la posizione di oggetti, di applicare pressione per prendere un oggetto, o di trovare un oggetto fra altri. Particolarmente importanti sono i sensi del tatto e della vista. Dei sensori di pressione montati nella "mano" del robot forniscono una retroazione per regolare la pressione di afferramento allo scopo di prevenire che l'oggetto cada o si rompa nella mano. Inoltre, in alcune applicazioni è necessaria una determinata forza torcente (coppia) o il rilevamento della distanza fra gli oggetti.
I sistemi di visione sono complessi e richiedono un calcolatore per elaborare l'immagine vista dall'"occhio" del robot. L'elaborazione delle immagini e le tecniche di analisi trasformano l'immagine visiva generata da un sistema a telecamera in una forma usabile dal controllore del robot per prendere decisioni concernenti le successive azioni da svolgere. La telecamera può essere montata sul robot stesso o può essere situata lontana, a seconda dell'applicazione.

Specifiche

Prima di scegliere un robot, si deve sviluppare un gruppo di specifiche sulla base dell'applicazione a cui esso è destinato. Alcune delle specifiche da considerare sono elencate nella *Tabella 9-1.*

QUANDO SONO UTILI I ROBOT

I robot non forniscono la soluzione universale per problemi di produzione quali le difficoltà economiche e la concorrenza internazionale, ma possono offrire numerosi vantaggi ad una azienda. Alcuni di questi vantaggi sono elencati nei paragrafi che seguono.

Miglioramento qualitativo della produzione

I robot non risentono delle condizioni di lavoro e non si stancano. Il loro lavoro è ripetibile e prevedibile. La sindrome della scarsa qualità e scarsa produzione del lunedì e del venerdì, tipica degli uomini, non esiste nei robot. La qualità di produzione è uniforme.

Aumento di produttività

I robot non si fermano per prendere il caffè o per chiacchierare, possono lavorare con un ritmo sostenuto e raramente si "ammalano". A causa di ciò, il loro uso quasi sempre dà luogo ad un aumento di produttività.

Lavoro in ambiente sgradevole o pericoloso

Uno dei maggiori vantaggi dei robot è la loro capacità di operare in condizioni ambientali che sono sgradevoli o inadatte agli uomini. I robot possono sopportare livelli molto più elevati di calore, polvere, radioattività, rumore e vapori nocivi senza alcun abbassamento di qualità o produttività.

	Sistema di azionamento	Sistema di controllo	Controllo di percorso	Capacità di memoria	Asse di movimento	Massimo carico (Kg)	Velocità (cm/sec)	Precisione ripetibile (mm)
CINCINNATI MILACRONT[3]	Idraulico/ Elettrico	Servo Calcolatore	Continuo	700 posiz.	6	45,4	127	1,27
UNIMATION UNIMATE 2100B	Idraulico/ Elettrico	Servo Calcolatore	Da punto a punto continuo	2084 posiz.	Da 3 a 6	136		2
SEIKO 200	Pneumatico	Meccanico	A stop	2 assi	4	0,75	762	0,01
WESTINGHOUSE 6000	Elettrico	Servo Calcolatore	Da punto a punto continuo	500 posiz. Parole 64K	5	45,4	25400	0,127
MTS 200A	Idraulico	Servo Calcolatore	Da punto a punto continuo	2000 posiz.	Da 4 a 6	100	0-180^{o} per secondo	0,63
THERMWOOD SERIES 3	Idraulico	Servo Calcolatore	Da punto a punto	200 posiz.	5	22,7	0,75	1,5
UNIMATION PUMA		Servo Calcolatore	Continuo	Parole 64K	Da 5 a 6	2,27	1016	0,1

Tabella 9-1. Specifiche di robot disponibili sul mercato

Miglioramento di immagine

Non è neppure da sottovalutare l'aspetto delle pubbliche relazioni. L'impiego dei robot può aumentare l'immagine positiva di una società agli occhi degli azionisti o dei clienti. Può indicare che la società è tecnologicamente all'avanguardia e può suggerire che la sua produzione è all'avanguardia anche in altre aree.

Riduzione dei costi di addestramento

Molti robot sono facilmente istruibili per effettuare i compiti loro assegnati. L'addestramento o il riaddestramento delle persone sovente richiede più tempo e risulta più costoso.

Piccole modifiche agli impianti

I robot solitamente possono essere installati negli impianti esistenti con solo pochi cambiamenti. Può essere necessaria un'alterazione della linea di montaggio per fornire lo spazio richiesto dal robot e possono essere necessari dei cavi di maggiori dimensioni per l'alimentazione di energia elettrica, ma non è necessario realizzare degli stabilimenti completamente nuovi. Lo spazio richiesto da un robot è chiamato "volume di lavoro". La *Figura 9-13* mostra il volume di lavoro per un particolare robot a struttura cilindrica e la *Figura 9-14* quello per un robot a struttura polare.

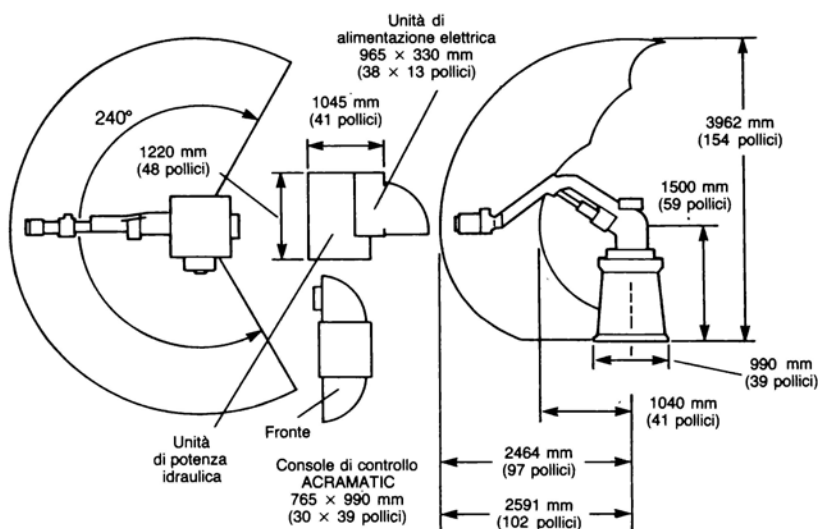



Figura 9-13. Requisiti di spazio di lavoro per il Cincinnati Milacron T^3 (Per concessione della Cincinnati Milacron)

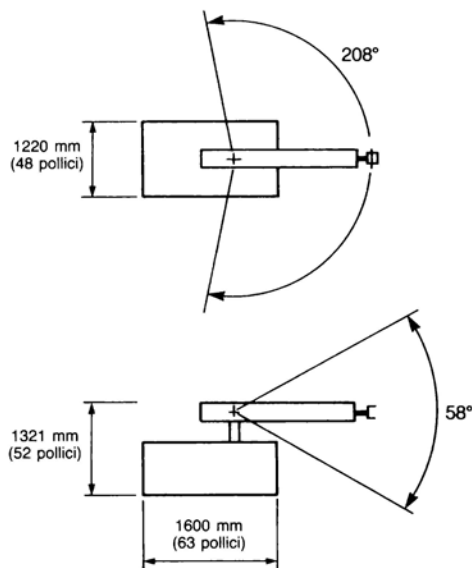



Figura 9-14. Requisiti di spazio di lavoro per l'Unimation 2000 (Per concessione della Unimation Inc., Danbury, CT)

Un buon profitto sugli investimenti

Occorre valutare gli investimenti in robot per determinare la rapidità con la quale consentono profitti. Alcune analisi sono quasi incredibili. Per esempio, un robot ha migliorato il tempo di saldatura ad arco dal 30 al 70%, e ha determinato un profitto medio annuale sull'investimento superiore al 600%, per un periodo di cinque anni. Anche un profitto sull'investimento compreso fra il 15 e il 30% può giustificare l'impiego di robot.

Sintesi dei vantaggi

In sintesi, i robot possono essere impiegati per aumentare la produttività e la qualità del prodotto, per ridurre la necessità di addestramento e per migliorare il profitto sugli investimenti. Inoltre possono essere usati in condizioni ambientali difficili e per lavori che richiedono un particolare sforzo fisico. Tutte le applicazioni devono però essere attentamente valutate per assicurarsi che i robot siano effettivamente necessari. In futuro le prestazioni dei robot aumenteranno, ed essi avranno un ruolo sempre più importante nei sistemi di fabbricazione.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. Un robot industriale è un manipolatore programmabile con la capacità di svolgere dei compiti spostando parti materiali o utensili speciali in un modo prescritto.
2. Molti nuovi robot sono controllati a calcolatore e sono chiamati robot intelligenti.
3. La maggior parte dei robot è costruita in forma polare o cilindrica e può manipolare dei carichi variabili da pochi grammi a centinaia di chilogrammi.
4. I robot sono classificati in conformità al tipo di sistema di controllo, alla capacità di memoria, agli assi di movimento, al campo di pesi sollevabili, alla loro velocità e alla loro precisione.
5. Il profitto sugli investimenti in robot può essere molto elevato.

Quiz per il Capitolo 9

1. Quale dei seguenti dispositivi verrebbe classificato come robot dal Robot Institute of America?
   a. Automobile.
   b. Manipolatore di presa e collocamento.
   c. Mano artificiale.
   d. Tutto quanto sopra.

2. Un robot intelligente può:
   a. prendere decisioni.
   b. manipolare soltanto piccoli carichi.
   c. parlare.
   d. camminare.

3. La struttura fisica di un robot può essere di:
   a. forma angolare o perpendicolare.
   b. forma polare o perpendicolare.
   c. forma cilindrica o polare.
   d. tutto quanto sopra.

4. L'energia che aziona un manipolatore può essere:
   a. elettrica.
   b. pneumatica.
   c. idraulica
   d. tutto quanto sopra.

5. Un robot servocontrollato:
   a. si ferma soltanto in punti fissi di ciascun asse.
   b. può accelerare.
   c. deve essere azionato elettricamente.
   d. deve essere azionato idraulicamente.

6. Quali dei seguenti metodi possono essere usati per insegnare a un robot cosa deve fare?
   a. Spostamento manuale lungo il percorso che dovrà compiere.
   b. Impostazione di arresti meccanici.
   c. Programma a software.
   d. Tutto quanto sopra.
   e. "a" e "c" sopra.

7. I linguaggi di programmazione correntemente disponibili per i robot:
   a. possono essere linguaggi da punto a punto.
   b. richiedono un apprendimento.
   c. possono consentire un movimento primitivo.
   d. tutto quanto sopra.
   e. nulla di quanto sopra.

8. I vantaggi dei robot includono:
   a. un aumento di produttività.
   b. la capacità di resistere in ambienti pericolosi.
   c. un buon profitto sull'investimento effettuato.
   d. una migliore immagine dell'azienda.
   e. tutto quanto sopra.

9. I robot possono aumentare la produttività poiché:
   a. non si stancano.
   b. non vanno in vacanza.
   c. la qualità di produzione è uniforme.
   d. tutto quanto sopra.

10. I robot intelligenti:
   a. possono regolare la pressione di presa.
   b. hanno capacità di visione.
   c. possono rilevare la distanza fra gli oggetti.
   d. tutto quanto sopra.
   e. nulla di quanto sopra.

11. Un manipolatore di presa e collocamento è:
   a. un robot intelligente.
   b. il più flessibile di tutti i robot.
   c. capace di operazioni da punto a punto.
   d. usato soprattutto per il trasferimento di grosse parti.

12. La precisione di un robot di presa e collocamento può essere di:
   a. ± 0,013 millimetri.
   b. ± 0,25 millimetri.
   c. ± 0,125 millimetri.
   d. ± 1%.

13. Il metodo di programmazione di robot mediante spostamento manuale comporta:
   a. lo svolgere manualmente la procedura suggerita, con la supervisione dell'operatore, prima della programmazione.
   b. il far compiere fisicamente al robot tutti i movimenti che dovrà ripetere.
   c. lo spostamento del robot da una posizione ad un'altra.
   d. tutto quanto sopra.

14. La differenza fra un robot ad alta tecnologia e un robot a media tecnologia è:
   a. il campo di movimento del robot.
   b. la velocità di movimento.
   c. la precisione del robot.
   d. la complessità dei compiti che può svolgere.

15. La struttura di un robot:
   a. è determinata dai suoi usi potenziali.
   b. definisce il suo campo di movimento.
   c. definisce lo spazio di lavoro richiesto dal robot.
   d. tutto quanto sopra.

16. I movimenti dei robot:
   a. sono uguali per tutti i robot.
   b. solitamente imitano i movimenti dell'uomo.
   c. non dipendono dalla struttura dei robot.
   d. nulla di quanto sopra.

17. I movimenti di un robot possono comprendere:
- **a.** un movimento lungo coordinate x-y.
- **b.** la rotazione di polso.
- **c.** la rotazione di gomito.
- **d.** tutto quanto sopra.

18. L'effettore terminale di un robot:
- **a.** è la "mano" del robot.
- **b.** può essere un utensile.
- **c.** può avere un'azione di presa.
- **d.** tutto quanto sopra.

19. I robot sono classificati in base:
- **a.** al loro sistema di controllo.
- **b.** al carico manipolabile.
- **c.** agli assi di movimento.
- **d.** tutto quanto sopra.

20. Lo spazio di lavoro richiesto da un robot:
- **a.** è minore di quello di una persona che effettua le stesse operazioni.
- **b.** dipende dal tipo di robot usato.
- **c.** deve essere recintato.
- **d.** non dipende dall'applicazione.

CAPITOLO 10

ESEMPIO DI AUTOMAZIONE

IN QUESTO CAPITOLO

Questo capitolo riguarda l'automazione di una linea di montaggio per la fabbricazione di parti separate. L'automazione di una linea di montaggio solitamente viene considerata quando il volume di un prodotto è sufficientemente alto e la vita prevista per il prodotto è sufficientemente lunga da giustificare la spesa richiesta per lo sviluppo dell'impianto di automazione. Un corretto uso dell'automazione non soltanto riduce il tempo di montaggio, aumentando la produzione giornaliera, ma riduce anche il costo di fabbricazione del prodotto. Un prodotto di minor costo, a sua volta, viene venduto in maggior quantità, poiché un maggior numero di persone è disposta ad acquistarlo. Le industrie di apparecchiature elettroniche e di semiconduttori sono un buon esempio di questo effetto.
Questo capitolo pone l'enfasi sull'impiego del microcalcolatore come controllore del processo di automazione. Altri libri sono disponibili per chi abbia interesse ad approfondire gli aspetti meccanici dell'automazione; ciò non significa che la parte meccanica abbia uno scarso interesse, e infatti è vero proprio l'opposto, ma pone in evidenza come il microcalcolatore permette di semplificare la parte meccanica del progetto e consente di separare la funzione di controllo dall'attuatore. Così facendo, la funzione dell'attuatore può essere facilmente cambiata agendo sul software anziché riprogettando il controllo meccanico dell'attuatore; questo vantaggio può non risultare evidente quando viene progettato un sistema di automazione, ma successivamente è apprezzato.

PROCESSO DI SVILUPPO DI UN SISTEMA DI AUTOMAZIONE

Solitamente esiste più di un metodo per risolvere i problemi di fabbricazione. Pertanto è necessario decidere quale metodo verrà usato e a questo fine è necessario che il processo di automazione sia ben compreso. Gli insuccessi in un sistema di automazione solitamente non dipendono dalla sua progettazione, ma dal fatto di non avere completamente anticipato e specificato ogni requisito del sistema prima della progettazione.
Il miglior controllore del mondo non serve a nulla se viene scelto e applicato in modo sbagliato; pertanto prima di scegliere il controllore è necessario specificare opportunamente cosa deve essere controllato e come deve avvenire il controllo. L'impie-

go dell'elettronica nei sistemi di controllo ha consentito di automatizzare pressoché tutte le operazioni in modo facile ed efficace. Attualmente non è tanto necessario determinare se è possibile controllare un'operazione di un processo, quanto scegliere l'apparecchiatura adatta per effettuare il controllo. Molto probabilmente l'operazione, o il processo, è controllabile con un controllore elettronico.

Requisiti del sistema

Il primo passo consiste nel determinare le caratteristiche generali del sistema di controllo. Per esempio, se l'automazione riguarda una singola macchina dotata di un controllore, non è necessaria una complessa rete di comunicazioni con un controllore centrale. Viceversa, se il processo di lavorazione comporta l'uso di varie macchine che coprono un'ampia area dello stabilimento, potrebbe essere necessaria una rete di comunicazione con un controllore centrale come quella mostrata in *Figura 10-1.* Il controllore centrale può essere un minicalcolatore ad esempio della serie Texas Instruments TM990, un microcalcolatore ad esempio della serie TM990/100 come nella realizzazione descritta in questo capitolo, o un controllore a supervisione 5100.

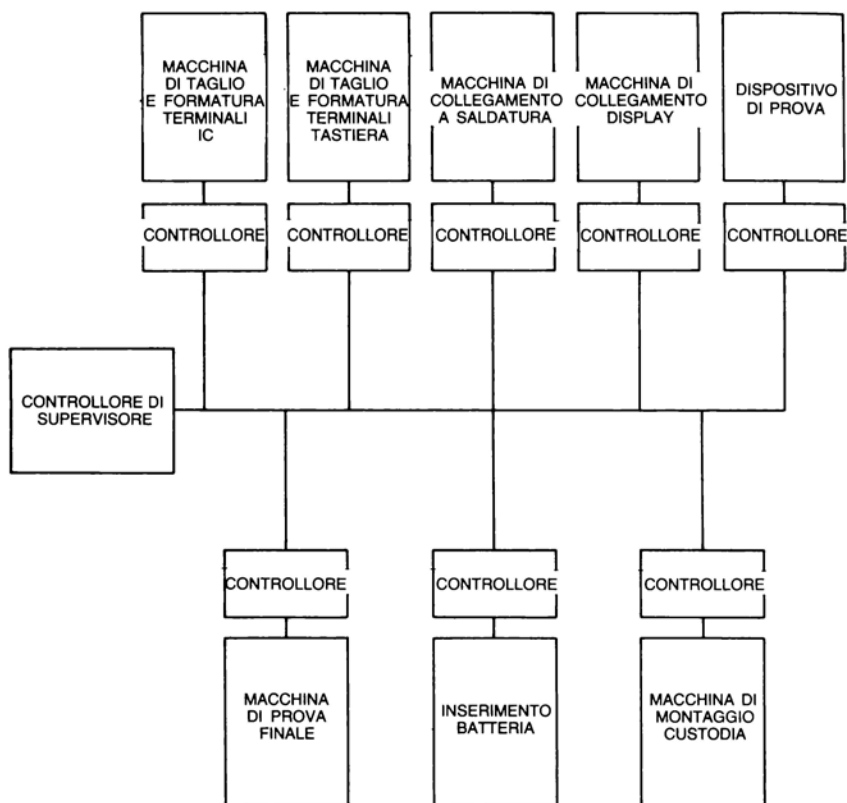



Figura 10-1. Schema a blocchi del sistema di montaggio dei calcolatori

Il progettista sovente è tentato di includere nel sistema delle caratteristiche opzionali non necessarie, semplicemente poiché queste sono disponibili, tuttavia occorre considerare che le difficoltà di un progetto aumentano rapidamente con l'aumentare della sua complessità ed è opportuno ricercare la massima semplicità possibile. Questo è particolarmente vero per i collegamenti di comunicazione, che siano utili ma non indispensabili.
Il modo migliore per risolvere il problema richiesto consiste nello scrivere una lista dettagliata di specifiche. Si analizzi ciascun aspetto nel massimo dettaglio possibile e poi, quando i requisiti sono ben definiti, si riducano le specifiche in modo da eliminare tutto ciò che non è necessario. Alcuni sistemi possono essere meglio definiti con un approccio dall'alto in basso, mentre per altri è opportuno formare la lista dal basso verso l'alto andando dalle parti singole al sistema generale.

Sviluppo del sistema di controllo

Dopo aver determinato i requisiti generali del sistema, possono essere definiti i singoli requisiti di controllo di macchina. In passato, poiché i sistemi richiedevano complesse reti di comunicazione o complesse manipolazioni di dati, erano necessari dei microcalcolatori e i controllori programmabili non risultavano adeguati. Tuttavia, poiché le possibilità dei controllori programmabili ora sono aumentate, questa linea di divisione attualmente è meno netta e occorre usare altri parametri per scegliere il controllore. Naturalmente, la capacità di soddisfare le specifiche del sistema è il primo requisito, ma anche il costo e la disponibilità di un servizio di riparazione o di cambio sono molti importanti. Un altro fattore importante, ma che rischia di essere trascurato, è la disponibilità di un servizio di assistenza per lo sviluppo del software.

Sviluppo di software

In *Figura 10-2* è mostrato un tipico flusso per lo sviluppo di software per un controllore. Anzitutto deve essere determinato il controllo della macchina in termini di operazione, velocità e punti di interfaccia I/O. Per questo compito può essere utile un diagramma di flusso del funzionamento della macchina. Se viene impiegato un controllore a microcalcolatore, la velocità di funzionamento può essere un fattore da valutare in funzione del linguaggio di programmazione scelto. Solitamente, i controllori programmabili hanno un loro linguaggio, come è già stato detto. Se viene usato un linguaggio di alto livello per la programmazione del microcalcolatore, solitamente la velocità di esecuzione è inferiore a quella dei programmi in linguaggio assembly. Pertanto, se la velocità è un fattore critico, è opportuno programmare in linguaggio assembly.
Dopo che è stato scelto il tipo di calcolatore e il linguaggio di programmazione, solitamente si deve prendere una decisione in merito al software del sistema operativo. Se viene progettato un sistema di automazione di notevoli dimensioni, solitamente è meglio usare un sistema operativo già pronto per il particolare microcalcolatore che viene usato. Per i piccoli sistemi, il codice del sistema operativo può essere scritto direttamente nel programma globale del sistema. Tuttavia questo potrebbe aumentare notevolmente il lavoro necessario per la riprogrammazione se il sistema viene cambiato; questo lavoro è minore quando viene usato un sistema operativo preparato anticipatamente, poiché questo è già previsto per adattarsi a numerose variazioni di input/output. Dopo aver descritto la struttura del software, occorre descrivere le operazioni della

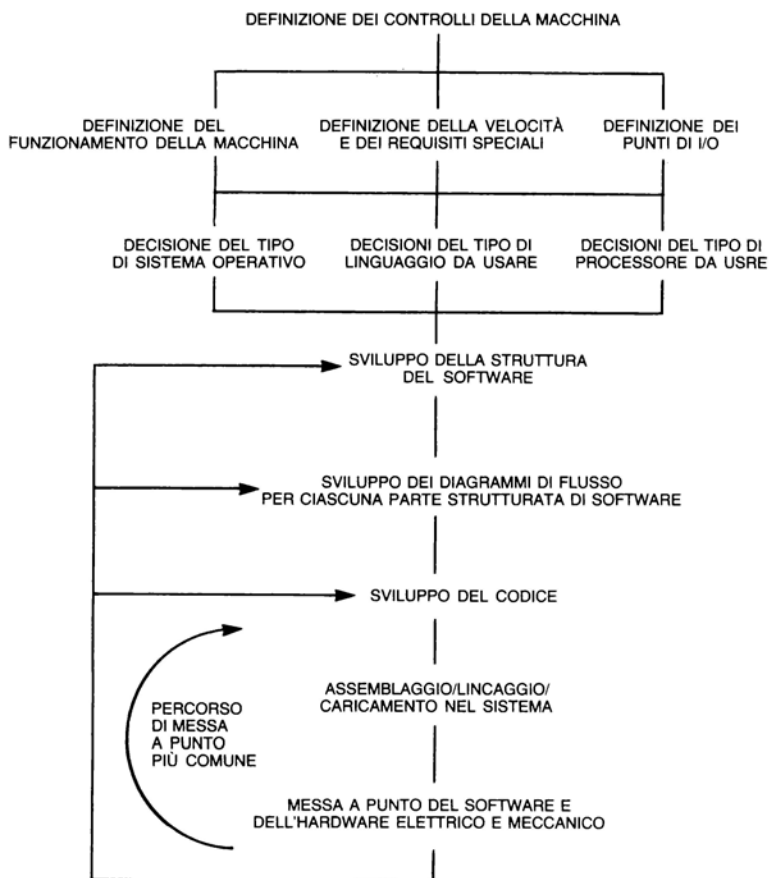



Figura 10-2. Diagramma del flusso per lo sviluppo di software

macchina mediante diagrammi di flusso. A tal fine possono essere necessari vari livelli di diagrammi di flusso, con quello più basso vicino al livello delle istruzioni effettivamente richieste dal programma.

In base al diagramma di flusso viene scritto il reale codice del programma. Alcuni progettisti ritengono che la prima cosa da fare sia scrivere il codice di programma, ma

si noti che in *Figura 10-2* la fase di codifica è abbastanza avanti nel ciclo di sviluppo.

È raro che sin dalla prima prova un programma funzioni esattamente come previsto, e pertanto sono normalmente necessarie varie prove, ricerche di errori (debugging) e modifiche, con vari passaggi nel ciclo delle ultime tre fasi di *Figura 10-2*. Tuttavia, se i problemi sono gravi, può essere necessario procedere ad alcuni rifacimenti della struttura del software e/o dei diagrammi di flusso.

Nei grandi sistemi il programma può essere sviluppato su un separato sistema di sviluppo che simula l'ambiente reale; in questo caso il programma completo deve essere immesso in RAM del microcalcolatore o inserito permanentemente in ROM.

ESEMPIO DI UNA LINEA DI MONTAGGIO AUTOMATIZZATA

Introduzione

Uno dei successi nel campo elettronico è lo sviluppo di piccoli calcolatori tascabili a basso costo. Questo prodotto al momento della sua introduzione nel mercato era costoso, e soltanto poche persone erano disposte a pagarne il prezzo. Oggigiorno è possibile acquistare per meno di 20 mila lire delle unità molto sofisticate con una capacità funzionale molto superiore a quella dei primi esemplari, e quasi ogni persona possiede almeno uno di questi calcolatori.

Come è successo tutto ciò? La maggior parte del merito deve essere attribuita ai progettisti di circuiti integrati e agli ingegneri di processo che sono stati in grado di far svolgere un maggior numero di funzioni elettroniche al chip semiconduttore, riducendo drasticamente il numero di parti da produrre e montare separatamente. Un altro fattore importante, tuttavia, è stato lo sviluppo di linee di produzione automatizzate che hanno consentito una maggiore rapidità di montaggio, in più alti volumi e a un costo inferiore di quello che sarebbe stato altrimenti possibile. In sostanza, il montaggio del calcolatore è passato da completamente manuale a quasi totalmente automatico, e l'automazione comprende anche la prova e l'imballaggio finale delle unità prodotte. Sebbene questo esempio riguardi il montaggio finale e la prova del calcolatore, una descrizione analoga potrebbe essere fornita per la fabbricazione dei singoli componenti utilizzati.

Diagramma di flusso del montaggio

Il processo di montaggio rappresentato nello schema di *Figura 10-3* ha un totale di 14 fasi. Questo comprende 4 fasi di premontaggio relative alla tastiera e al circuito integrato. Il processo richiede un trasferimento di materiale fra diverse stazioni, ma questo non è incluso nelle 14 fasi; in un sistema automatizzato, la fase di trasferimento del materiale può essere difficile da effettuare quanto il processo stesso e sovente rappresenta il maggior ostacolo per l'automazione di una linea di montaggio.

I sistemi di automazione risultano vantaggiosi soprattutto per i compiti più ripetitivi e più lunghi del processo di montaggio, non soltanto perché riducono la quantità di lavoro da svolgere, ma anche perché eliminano lavori noiosi che nessuno vuol fare. I restanti lavori manuali sono più interessanti.

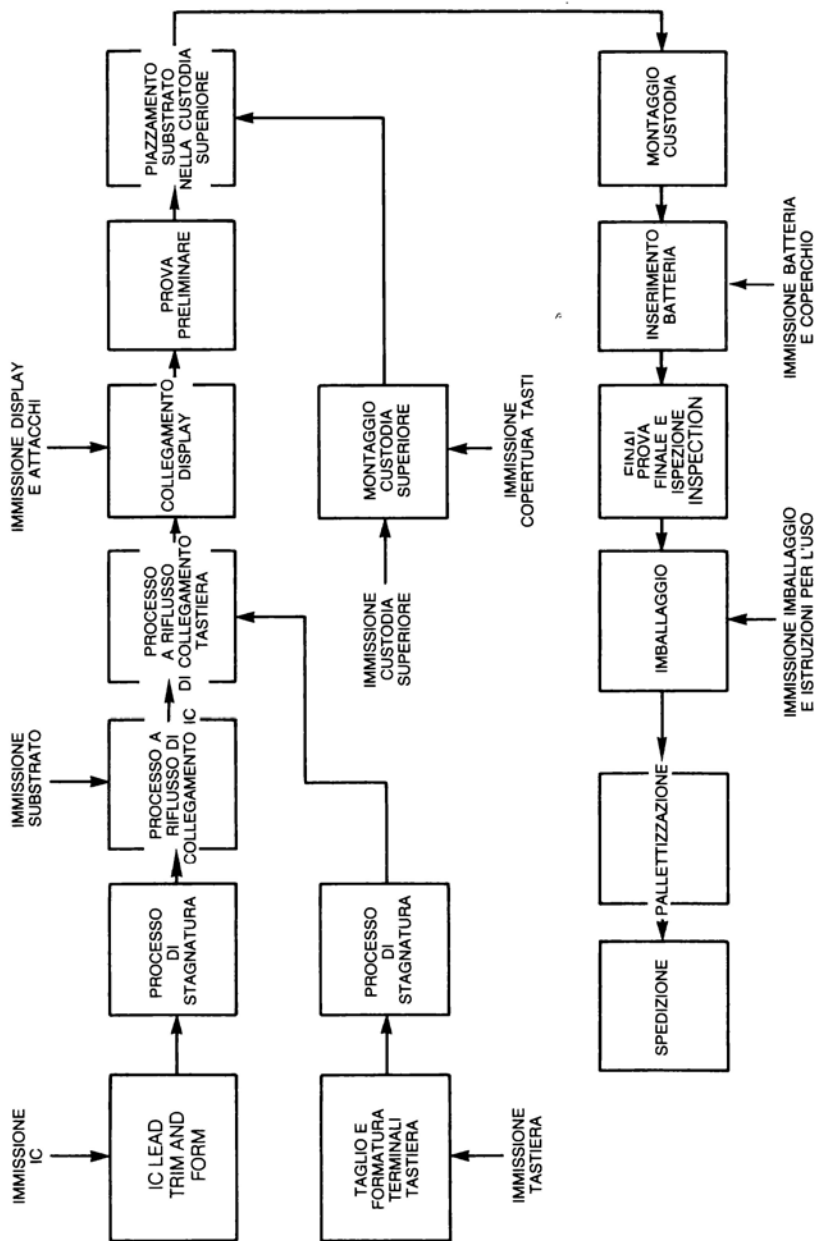



Figura 10-3. Diagramma di flusso dell'operazione di montaggio

REQUISITI DI SISTEMA

In questo esempio, i materiali e le parti erano già specificate e progettate, e pertanto era richiesto soltanto di automatizzare il montaggio in modo da poter costruire un calcolatore con una riduzione del tempo di montaggio di un fattore di 50.

Montaggio manuale

Il tempo richiesto per effettuare manualmente le operazioni era:

Operazione	Tempo (in secondi)
1. Taglio e messa in forma del circuito integrato.	14
2. Taglio e messa in forma della tastiera.	14
3. Stagnatura dei piedini dei circuiti integrati.	6
4. Stagnatura dei piedini della tastiera.	6
5. Collegamento del circuito integrato al substrato.	16
6. Collegamento della tastiera al substrato.	24
7. Collegamento del display al substrato.	32
8. Effettuazione di una prova funzionale preliminare.	60
9. Montaggio della tastiera nella semicustodia superiore.	10
10. Montaggio del substrato con i componenti nella custodia superiore.	15
11. Piazzamento della parte inferiore della custodia sulla parte superiore e incollaggio.	12
12. Inserimento delle batterie e del relativo coperchio.	12
13. Effettuazione della prova funzionale finale e della verifica.	75
14. Imballaggio.	12
Totale	308

Pertanto, il tempo totale di montaggio manuale per queste fasi era di 5 minuti e 8 secondi per unità, corrispondente a un ritmo di produzione di 11,7 unità all'ora per ogni montatore. Il costo di montaggio per unità con questo ritmo di produzione era determinato sommando il costo della retribuzione e delle spese generali, i costi per il trasferimento del materiale, i costi per la verifica e i controlli, e quelli per le inefficienze di linea determinate da un carico disuguale alle varie stazioni. Il costo di montaggio manuale venne usato come elemento di raffronto per il costo di montaggio e di attrezzatura del sistema automatico per valutare i risparmi ottenibili con l'automazione. Vi erano anche altri risparmi, come quelli derivanti da una riduzione nel personale di supervisione, dello spazio occupato, ecc., che avrebbero potuto essere considerati, ma questi risparmi erano in parte annullati dai costi di riparazione, di manutenzione e delle parti di ricambio per il sistema di automazione.

Montaggio automatico

Gli obiettivi posti per il montaggio automatico erano:

Voce	Obiettivo
1. Tempo di ciclo del sistema:	6 secondi/unità.
2. tempo medio fra i guasti (TMFG):	12 ore.
3. Tempo medio di riparazione (TMDR):	1 ora.
4. Disponibilità della linea:	90%.
5. Manutenzione preventiva:	1 volta al giorno.
6. Durata della macchina:	5 anni.
7. Servizio dell'operatore:	Alimentazione di parti 1 volta all'ora.
8. Versatilità:	Fabbricazione di tutti i futuri prodotti previsti in un triennio.
9. Controllo centrale:	Interfaccia seriale con tutte le macchine da parte della console centrale.

Determinando il numero di unità che sarebbero state fabbricate nella vita prevista di 3 anni del prodotto, con 2 turni di 8 ore al giorno per 5 giorni alla settimana e 50 settimane all'anno, risultò che il costo di montaggio automatizzato era inferiore del 37,5% a quello del montaggio manuale. Il costo del lavoro e delle spese generali, quello di progettazione e sviluppo della macchina e quello di attrezzatura della macchina erano inclusi nel costo di montaggio automatizzato. La riduzione di costi così trovate venne ritenuta sufficiente per giustificare la realizzazione della macchina.
Oltre al montaggio del prodotto, il sistema automatizzato ha il pregio collaterale di verificare e riportare sia lo stato della macchina sia la quantità di prodotti montati. I rapporti sulla produzione totale di parti montate, sul ritmo di scarti alle stazioni di prova intermedia e finale, l'effettivo ritmo di produzione di ogni macchina, lo stato di inventario, ecc., sono di aiuto al supervisore della linea per determinare se esistono problemi nei componenti o se è possibile aumentare la produzione.

Struttura di una macchina automatizzata

Il progettista meccanico deve determinare il modo migliore per svolgere le singole operazioni di montaggio. Deve decidere come ripartire le fasi, se è necessaria più di una macchina e se vi è qualche fase che potrebbe essere svolta manualmente in modo più efficiente. Deve inoltre valutare se il processo di montaggio può essere effettuato più vantaggiosamente da una macchina a processo continuo o in fasi separate.
In questa applicazione venne deciso di separare le macchine in base a compiti funzionali. Una macchina di processo continuo avrebbe provocato un arresto totale della linea se una sua qualsiasi parte si fosse guastata, ma una produzione a lotti permetteva un montaggio manuale al posto della macchina fuori servizio mentre il resto della linea poteva continuare in modo automatizzato. Questo consentì di predisporre soluzioni alternative in caso di guasto impiegando una minor quantità di personale e macchine meno complesse e meno costose. Poiché il processo continuo in questo caso non avrebbe migliorato il prodotto finale, venne scelto il metodo di produzione a lotti.

Per ciascuna parte di processo vennero usate una o più macchine separate in particolare per il taglio dei terminali, la stagnatura, il collegamento dei componenti, il montaggio della custodia, l'inserimento della pila, la prova e l'imballaggio. Per la prova venne prevista più di una stazione, poiché era necessario un tempo superiore a quello delle altre fasi del processo; ciò avviene anche quando la prova è automatizzata, poiché il calcolatore non può essere provato ad una velocità superiore a quella a cui può funzionare. Il numero delle macchine per ogni parte del processo venne scelto in modo che nessuna macchina funzionasse più a lungo delle altre, al fine di mantenere il richiesto ritmo nell'intero sistema. Verrà ora esposto più in dettaglio il processo di progettazione.

SPECIFICHE

Per realizzare un sistema occorre definire tutti i parametri di input e di output, compreso il flusso di materiali, l'interfaccia di operatore e l'interfaccia di sistema. Devono inoltre essere determinate le prestazioni di ogni macchina, inclusa la velocità, le operazioni da effettuare, i servizi richiesti, ecc. Per esempio, devono essere specificate le tolleranze di materiale e di macchina in modo che il materiale possa essere manipolato correttamente. Poiché nel montaggio di questo prodotto vengono usati differenti tipi di macchine, sono necessarie le specifiche di ognuna di esse, nonché le specifiche generali del sistema. Come esempio di specifiche di una singola macchina si consideri una macchina di saldatura a riflusso usata per effettuare i collegamenti elettrici.

Processo di saldatura a riflusso

Il processo di saldatura a riflusso (rifusione) avviene come segue: le parti da riunire vengono immerse in un bagno caldo di metallo di saldatura che ne riveste i terminali. Alle due parti da riunire viene applicato un fondente al fine di pulirne le superfici, e successivamente i terminali sono scaldati per fondere nuovamente il metallo di saldatura mentre le due parti vengono tenute in contatto fra loro. Il metallo di saldatura "rifluisce" fra i terminali metallici e l'erogazione di calore viene sospesa. Il metallo viene fatto raffreddare mantenendo le parti in contatto fra loro, cosicché si forma un collegamento meccanicamente resistente. La macchina di saldatura a riflusso impiega questo processo per collegare i circuiti integrati e la tastiera sul substrato.

Specifiche delle macchine di saldatura a riflusso

1. Tempo di ciclo: 6 secondi o meno.
2. Ciclo del processo di saldatura: applicazione del fondente, allineamento delle parti, applicazione della pressione, applicazione del calore, raffreddamento sotto pressione, rilascio delle parti.
3. Controllo del processo di saldatura: l'operatore predispone gli input per il tempo di riscaldamento e per quello di raffreddamento; tutti gli altri parametri sono definiti dal tecnico di controllo.
4. Precisione di allineamento: le parti devono essere allineate sul substrato con una tolleranza di 0,125 mm, variabile al momento della regolazione della macchina.

5. Immissione di componenti: il substrato deve essere caricato manualmente e non richiede alcun particolare contenitore. La macchina deve verificare se il substrato è stato caricato in modo corretto e deve essere in grado di manipolare 2 tipi di substrati. I circuiti integrati sono forniti in tubi contenenti circa 20 unità già correttamente orientate. Le tastiere sono poste in contenitori metallici da circa 100 pezzi. Le dimensioni dei contenitori sono definite in modo da poterne manipolare 5 tipi senza orientamenti scorretti. Il fondente è necessario in due punti del substrato.
6. Emissione dei componenti: non è necessaria una manipolazione speciale. La successiva fase sarà a caricamento manuale.
7. Funzionamento di macchina: la macchina deve essere in grado di effettuare automaticamente il trasporto di tutto il materiale e di diagnosticare eventuali funzionamenti scorretti. La macchina deve inoltre essere in grado di operare anche senza materiali, come richiesto per le regolazioni e la diagnostica.
8. Riparazioni e manutenzione: la macchina dovrà fare un'autodiagnosi di tutti i funzionamenti meccanici scorretti ed evidenziare i problemi all'operatore. Dovrà essere disponibile un controllo passo a passo e di ogni singola stazione per lo svolgimento delle operazioni di riparazione e manutenzione.

REALIZZAZIONE DELLA MACCHINA DI SALDATURA A RIFLUSSO

Per questa applicazione è stato scelto un sistema a microprocessore digitale per consentire una progettazione meccanica più semplice, un minor tempo di ciclo di macchina, più facili verifiche e più facili comunicazioni con le unità dislocate. La macchina di saldatura a riflusso sarà usata per illustrare il controllo a microprocessore. Questa macchina è una delle sei che sono state sviluppate per il processo di montaggio; le altre cinque sono simili ad essa e usano lo *stesso* microprocessore come controllore.

HARDWARE DEL CONTROLLORE

Esistono vari metodi per realizzare un controllore digitale, e il più efficace consiste nell'usare componenti disponibili commercialmente in modo da ridurre al minimo la progettazione. Questo modo di procedere ha vari vantaggi. Usando componenti già progettati, costruiti e provati si risparmia tempo e denaro, e il tecnico di progettazione si limita essenzialmente a riunire i vari componenti per formare il sistema desiderato. In questo modo, l'utente finale può scegliere i particolari dispositivi necessari per una determinata operazione. Esistono sistemi standard a microcalcolatore con un ampio campo di possibilità fornite da vari pannelli I/O, interfacce standard RS232 e espansioni di memoria. I componenti sono progettati in modo da poter cooperare fra loro, cosicché l'interfacciamento delle differenti parti del sistema di controllo non costituisce un problema. Inoltre, la maggior parte della documentazione del sistema di controllo è già sviluppata, e anche questo aiuta a risparmiare tempo e denaro.
L'intero processo di controllo della macchina di saldatura a riflusso è controllato da un microcalcolatore a pannello singolo (TM990/102) mostrato in *Figura 10-4*. Questo microcalcolatore usa come CPU un microprocessore a 16 bit TMS990. Altre caratteristiche del microcalcolatore sono: indirizzamento esteso a un megabyte, EPROM espandibile a 16K byte, sino a 128K byte di RAM dinamica incorporata, 16 interruzioni vettoriali a priorità e una porta RS232.

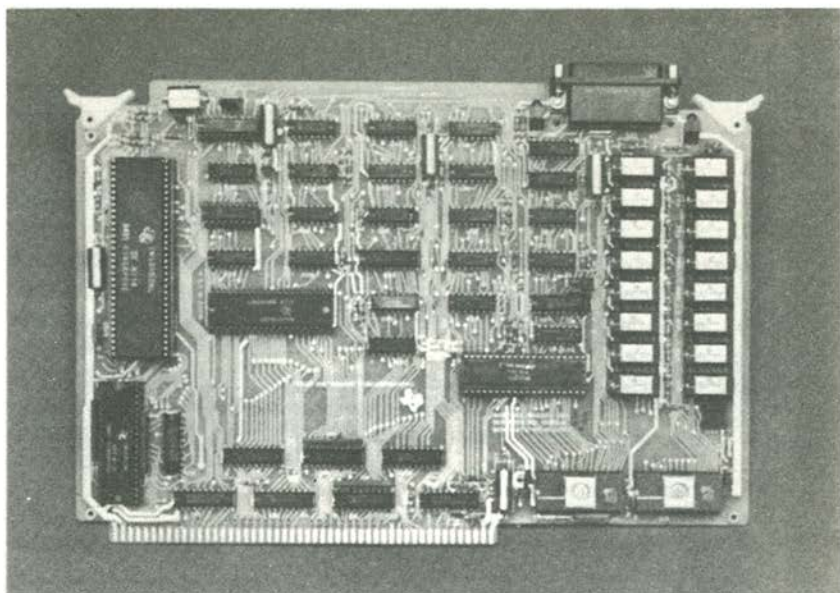



Figura 10-4. Pannello del microcalcolatore TM990/102

In questa applicazione, assieme al calcolatore per gli I/O e le comunicazioni sono usati un pannello di comunicazione RS232, tre pannelli standard di controllo di unità periferiche e tre pannelli speciali di controllo per i motori a passi. La disposizione fisica del sistema di controllo è illustrata in *Figura 10-5*, mentre la *Figura 10-6* mostra un diagramma a blocchi dello stesso hardware. Il resto del sistema è costituito dagli alimentatori, dai cavi e dai dispositivi I/O. Tutti gli I/O, ad eccezione del controllo del motore a passi, possono essere collegati con pannelli standard già disponibili; il pannello per il controllo del motore a passi ha invece dovuto essere progettato appositamente per questa applicazione, usando un pannello disponibile per i prototipi.
Il microcalcolatore effettua, sotto il controllo del programma, la maggior parte della temporizzazione e dei controlli del sistema. Tuttavia i motori a passi per funzionare correttamente richiedono una temporizzazione critica, ed è difficile controllare la temporizzazione del motore usando un controllo a software, dato che i tempi di esecuzione del microcalcolatore variano in funzione della serie di istruzioni del programma che vengono eseguite. A causa di ciò, la temporizzazione viene controllata da una logica ad hardware posta sui pannelli di controllo dei motori a passi. Gli interruttori di output sul pannello sono dei singoli transistori in grado di controllare la corrente di vari ampere necessaria per azionare i motori alle velocità richieste dalle caratteristiche di temporizzazione generale.

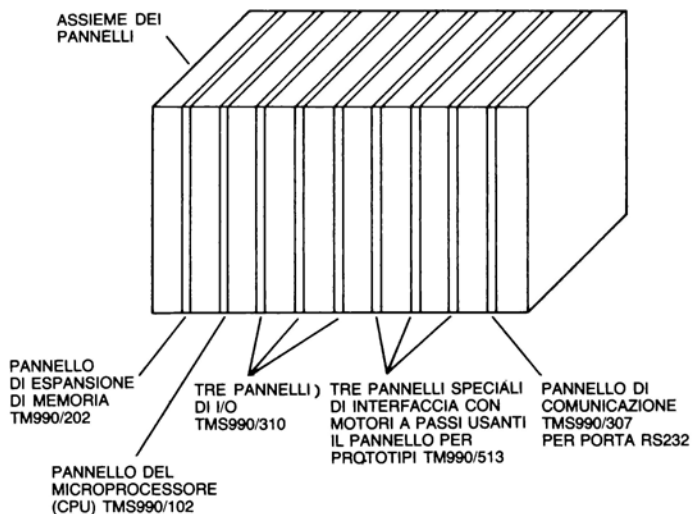



Figura 10-5. Assieme dei pannelli del sistema di controllo

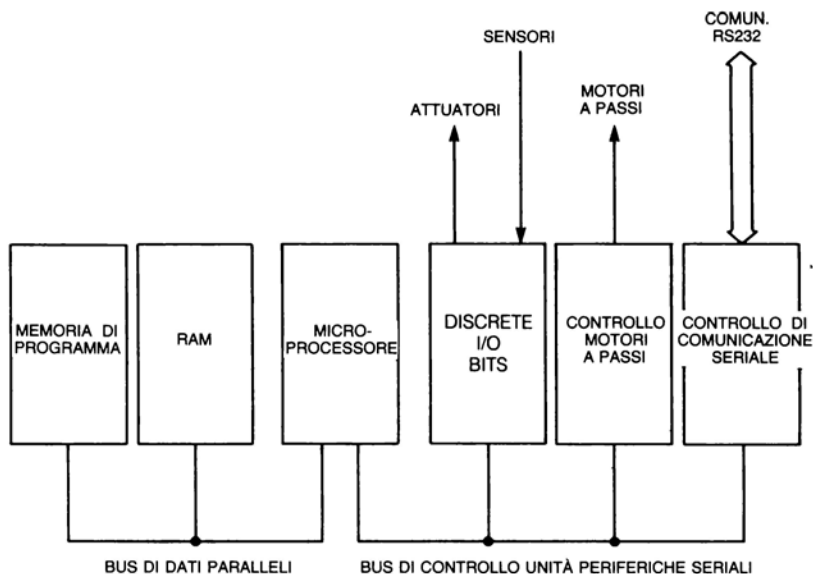



Figura 10-6. Schema a blocchi del sistema di controllo

I due elementi riscaldatori per le operazioni di saldatura a riflusso sono controllati individualmente con un controllo PI in modo da mantenere una precisa temperatura. Ciascun controllore dei riscaldatori fornisce al microcalcolatore le informazioni sulla temperatura, in modo che quest'ultimo possa mantenere il controllo generale del sistema.

SOFTWARE PER IL CONTROLLORE

Lo sviluppo del software per questo controllore è stato fatto in modo strutturato, come mostrato in *Figura 10-7.* Per controllare la macchina sono stati usati vari livelli di software, e ogni livello è stato sviluppato in modo che soddisfasse taluni ben definiti requisiti di interfaccia. Ciò ha permesso a vari programmatori di sviluppare indipendentemente differenti livelli di programma e di avere un corretto funzionamento del programma quando i vari elementi sono stati riuniti. Un software sviluppato in moduli di questo tipo solitamente può essere utilizzato anche in altre applicazioni. Alcuni di questi moduli sono analizzati nei paragrafi che seguono.

Sistema operativo

Si può sviluppare un sistema operativo o usarne uno già disponibile presso il fabbricante del microprocessore. Un sistema operativo è un programma che fa cooperare correttamente fra loro i vari componenti del sistema; trasferisce informazioni fra differenti routine di software quando la macchina è in funzione, e tiene traccia delle funzioni di base come la generazione di un ritardo di temporizzazione o il controllo di errori. Pertanto, rende possibile lo sviluppo di brevi subroutine di programma e la loro riunione in un completo programma di controllo in grado di eseguire compiti molto complessi.

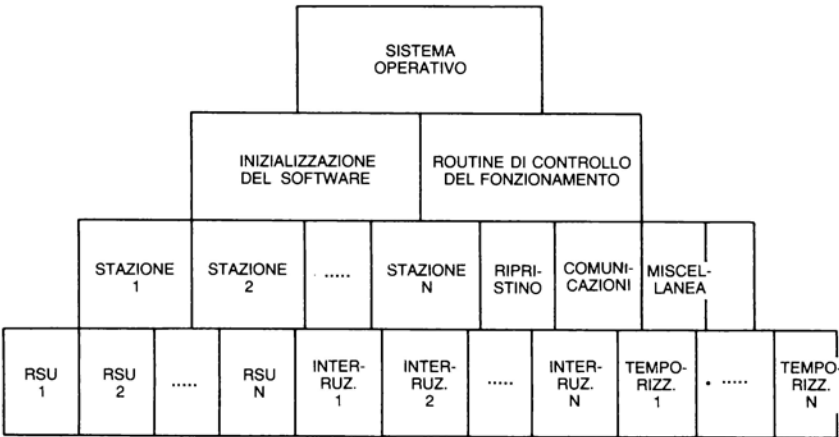



Figura 10-7. Struttura generale del software

Molto è stato scritto sui sistemi operativi, su come essi vengono sviluppati e su come operano. Non è il caso, qui, di entrare in dettagli (altri libri sono disponibili per questo scopo), ed è sufficiente indicare che esiste un sistema operativo, che è molto importante per il funzionamento del sistema, e che viene usato dai tecnici e dagli ingegneri per sviluppare il software del sistema.

Blocco di controllo delle funzioni

Affinché il sistema operativo possa controllare correttamente le subroutine richieste dal programma generale, ogni subroutine dovrà avere associato un blocco di informazioni, chiamato blocco di controllo delle funzioni (BCF). Questo blocco, come mostrato in *Figura 10-8*, ha una particolare disposizione che è stata decisa in anticipo. Il byte 1 contiene il nome della subroutine. Il byte 2 è disponibile per eventuali future necessità. Il byte 3 contiene dati sulla subroutine o sullo stato del sistema, e questi dati vengono controllati dal sistema operativo al momento dell'esecuzione della subroutine. Il byte 4 contiene un numero che informa il sistema operativo sul numero di variabili usate dalla subroutine. Il byte 5 indica l'indirizzo della posizione di memoria dove è immagazzinata la prima variabile; questo byte è chiamato puntatore, e il sistema operativo può avere la necessità di effettuare una ricerca nelle posizioni di memoria dal valore iniziale del puntatore sino al termine delle posizioni delle variabili per trovare una particolare variabile.
Quando la subroutine opera come parte del programma principale, i risultati della subroutine devono essere immagazzinati in una specifica posizione, in modo che un'altra subroutine sappia dove trovarli. Il byte 6 indica la prima posizione di memoria dove sono immagazzinati questi dati. Il byte 7 marca la fine del blocco di controllo delle funzioni.

BYTE	
1	NOME DELLA ROUTINE DA ESEGUIRE
2	BYTE DI RISERVA
3	BYTE DI STATO
4	N° DI BYTE DELLE VARIABILI
5	PUNTATORE CHE INDICA DOVE SI TROVANO LE VARIABILI
6	PUNTATORE CHE INDICA DOVE COLLOCARE I RISULTATI
7	FINE DEL BLOCCO

Figura 10-8. Blocco di controllo delle funzioni

Routine di controllo del funzionamento

La routine che effettua la supervisione di tutti i programmi che controllano l'hardware del sistema per svolgere i compiti applicativi viene chiamata routine di controllo del funzionamento (RCF). È questa routine che decide in ogni momento quale specifico compito applicativo debba essere eseguito. La routine di controllo di funzionamento commuta continuamente da un compito a un altro in modo che la CPU sia sempre impegnata e utilizzata efficientemente. La CPU, sebbene possa svolgere soltanto un'istruzione per volta, è molto rapida, mentre l'hardware della macchina solitamente richiede un tempo relativamente lungo per reagire a un comando del controllore.
Per esempio, per far operare il cursore di trasporto che verrà descritto in seguito, è necessaria l'impostazione di due soli bit, e il controllore può impostarli in meno di un millisecondo. Dopo che i due bit sono stati impostati, è necessario quasi mezzo secondo affinché il cursore arrivi al termine del suo percorso, e durante questo tempo il microcalcolatore può elaborare più di 5000 istruzioni. Pertanto, se il software è opportunamente strutturato, il controllore può effettuare numerose operazioni mentre il cursore si sposta, anziché attendere senza operare. Durante l'elaborazione delle altre istruzioni, il controllore può verificare periodicamente la posizione del cursore per determinare quando ha raggiunto il termine del suo percorso. Questa capacità del controllore di svolgere contemporaneamente vari compiti può essere paragonata a quella di un giocoliere che lancia in aria un gruppo di palle in modo che una sola per volta di esse richieda un'azione da parte del giocoliere stesso.

Flag

Un flag è un bit indicatore in un registro o in una posizione di memoria che segnala una condizione se è settato (cioè uguale a 1) o un'altra condizione se è resettato (cioè uguale a 0). In altri termini, è simile all'innalzamento o abbassamento di una bandierina di segnalazione. Una subroutine di programma può verificare lo stato di un particolare flag per decidere la successiva azione da compiere.

Funzionamento della routine RCF

Il funzionamento della routine di controllo di funzionamento (RCF) è illustrato in *Figura 10-9a*. Il puntatore del flag di compito indica il numero del successivo compito da svolgere e viene incrementato di 1 ogniqualvolta l'RCF opera. L'RCF controlla il flag di esecuzione del compito indicato al momento. Se questo flag è settato, il compito viene svolto; se non è settato, il compito viene saltato. Si supponga che il puntatore del flag di compito sia rivolto al compito 1, e che il flag di esecuzione del compito 1 sia settato, cosicché il compito 1 debba essere svolto subito dopo.
L'RCF verifica il puntatore di compito per ottenere l'indirizzo di memoria che contiene il puntatore di programma per il compito 1 e carica il contenuto di questo indirizzo nel contatore di programma della CPU. Quindi la CPU comincia ad eseguire il programma del compito 1. Si supponga ora che si verifichi una interruzione, e che il compito 1 venga fermato prima del suo completamento. L'indirizzo della successiva istruzione per il compito 1 viene salvato nella posizione del puntatore del programma per il compito 1, cosicché quando il puntatore di flag di compito consente nuovamente l'esecuzione del compito 1, questa inizierà dal punto in cui si trovava quando si è verificata l'interruzione.

Il controllo è quindi riportato all'RCF, che verifica lo stato del puntatore del flag di compito. Poiché è stato incrementato di 1, esso controlla ora il flag di esecuzione del compito 2, e lo trova settato. Il contenuto del puntatore di programma del compito 2 viene caricato nel contatore di programma e la CPU inizia ad eseguire il compito 2. Si supponga che il compito 2 arrivi a completamento, cosicché il flag di esecuzione del compito 2 è azzerato e il puntatore di programma per il compito 2 viene caricato con il suo indirizzo iniziale per preparare la sua prossima esecuzione.
Il controllo viene riportato nuovamente all'RCF e la sequenza è ripetuta per ogni compito

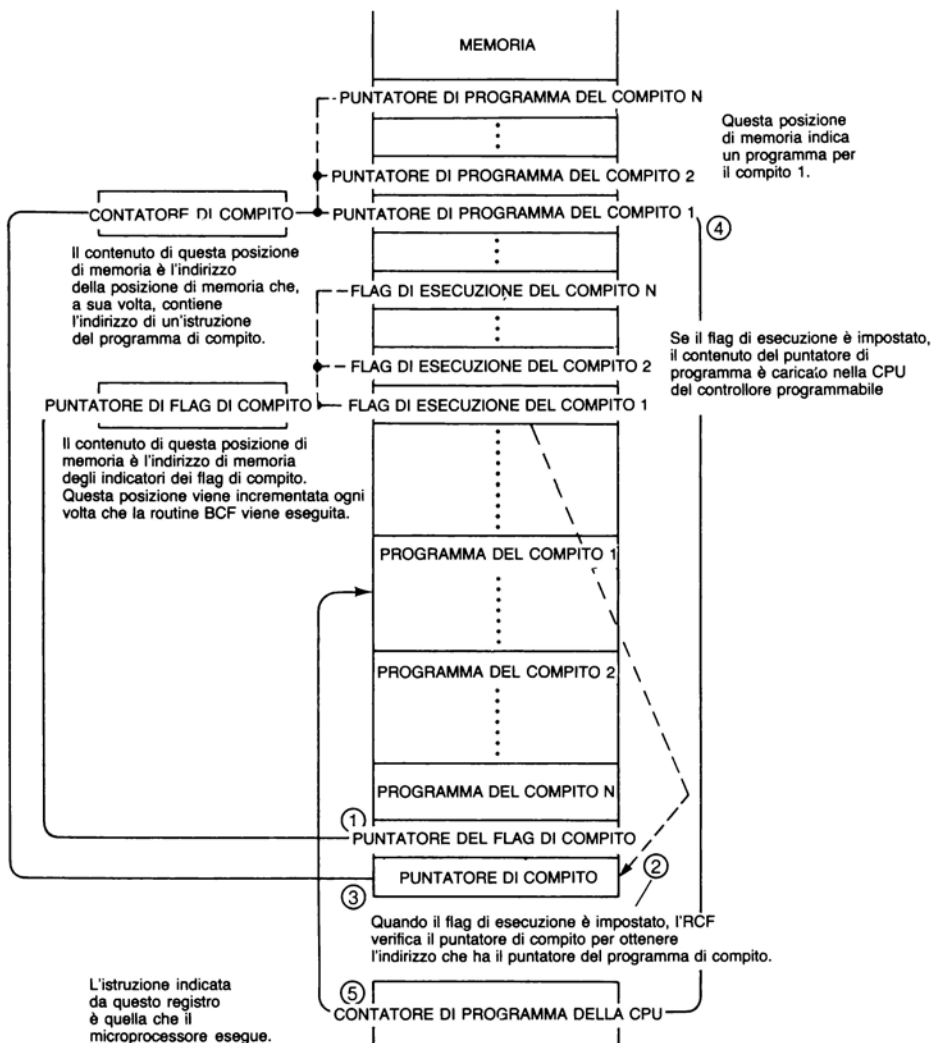



Figura 10-9. Esempio di routine di controllo del funzionamento

fino a quando il compito N è stato svolto o escluso. Ora il puntatore del flag di compito indica nuovamente il compito 1. Il suo flag di esecuzione è ancora settato, poiché il compito non era stato completato, cosicché il contenuto del puntatore del programma del compito 1 è caricato nel contatore di programma e la CPU inizia ad eseguire il compito 1 dal punto in cui si era verificata l'interruzione. In questo modo i programmi dei compiti sono svolti in modo intercalato, e ciascuno di essi opera sino a quando avviene qualcosa che lo arresta, solitamente un'operazione di I/O, opera quindi il programma successivo, e così di seguito.

Routine di servizio di unità

Un'altra routine usata dal sistema operativo per differenti unità periferiche di input/output è chiamata routine di servizio di unità (RSU). I fabbricanti di microcalcolatori hanno routine di servizio di unità standard disponibili per numerose unità periferiche standard, come uno schermo a raggi catodici o una stampante per linee. Tuttavia per particolari I/O di sistemi di automazione, come un motore a passi, l'utente solitamente deve sviluppare una routine RSU in grado di controllore il funzionamento dell'unità in questione.

La routine RSU fornisce l'appropriata temporizzazione e la logica per l'hardware delle unità periferiche. Per esempio, può essere scritta una routine di questo tipo per il trattamento dei segnali logici provenienti da una tastiera in modo da porre il codice di un particolare tasto abbassato in una determinata posizione di un buffer di memoria indicata dall'utente. A questo punto il programma di applicazione richiede soltanto la lettura del buffer per ottenere l'input di tastiera, e non è necessario che sappia come decodificare i segnali di tastiera o da dove proviene l'input. Se viene deciso di fornire questo input da un lettore di schede perforate anziché dalla tastiera, il programma di applicazione non deve essere cambiato, e deve essere soltanto modificata la routine RSU in modo che legga l'input dal lettore di schede e lo ponga nello stesso buffer. Pertanto, la stessa routine RSU può essere usata per numerosi compiti applicativi di tipo differente.

Una tipica routine RSU è mostrata in *Figura 10-10.* Questa routine viene usata nella macchina di saldatura a riflusso per rilevare quali tasti sono stati abbassati nella tastiera usata dall'operatore per immettere i parametri di controllo o per inquisire lo stato della macchina. La routine è attivata da un blocco di controllo di file (BCF), e i risultati della routine sono posti nelle posizioni di memoria specificate dal BCF. Le istruzioni sono del tipo usato per la famiglia di sistemi 9900, e sono adatte per il microprocessore della famiglia 9900 usato nel microcalcolatore TM990/102.

Programmi applicativi

I singoli programmi applicativi, che sono stati chiamati compiti, svolgono le particolari funzioni logiche richieste da una specifica parte della macchina. Se la macchina è abbastanza semplice, i programmi di compito possono essere l'unico software da scrivere. In questo esempio viene scritto un compito per ciascun blocco funzionale, e ciascuno di essi opera soltanto quando viene chiamato dalla RCF. Quando l'esecuzione del compito è terminata, un bit di stato (flag) viene settato per la notifica alla RCF. Solitamente un altro bit di stato indica se l'operazione si è svolta correttamente o se si è verificato un errore.

Tasto premuto	Dati di fila	Dati di colonna	Equiv. esadec. F/C	Codice binario per il valore del tasto premuto
C	0001	0001	11	1100
B	0001	0010	12	1011
2	0010	0100	24	0010
4	0100	1000	48	0100

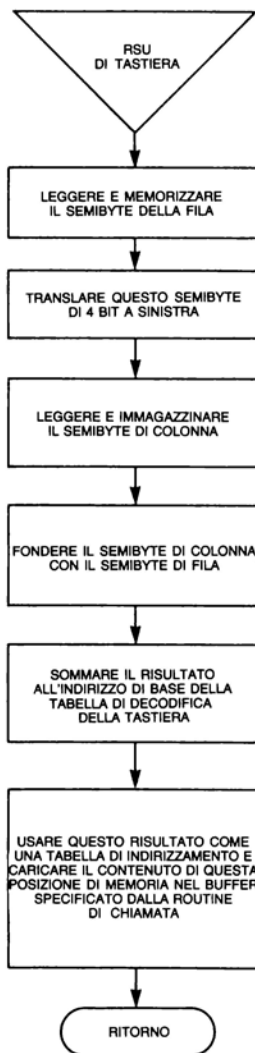



Figura 10-10. Esempio di routine di servizio di unità

IL MECCANISMO DI TRASPORTO

Le funzioni effettuate su questa macchina sono:

1. Caricamento di un substrato.
2. Collegamento del circuito integrato al substrato (2 stazioni).
3. Collegamento della tastiera al substrato (2 stazioni).
4. Invio dell'assieme al successivo processo di montaggio.
5. Trasporto del substrato attraverso le fasi del processo e controllo delle entrate dei componenti.

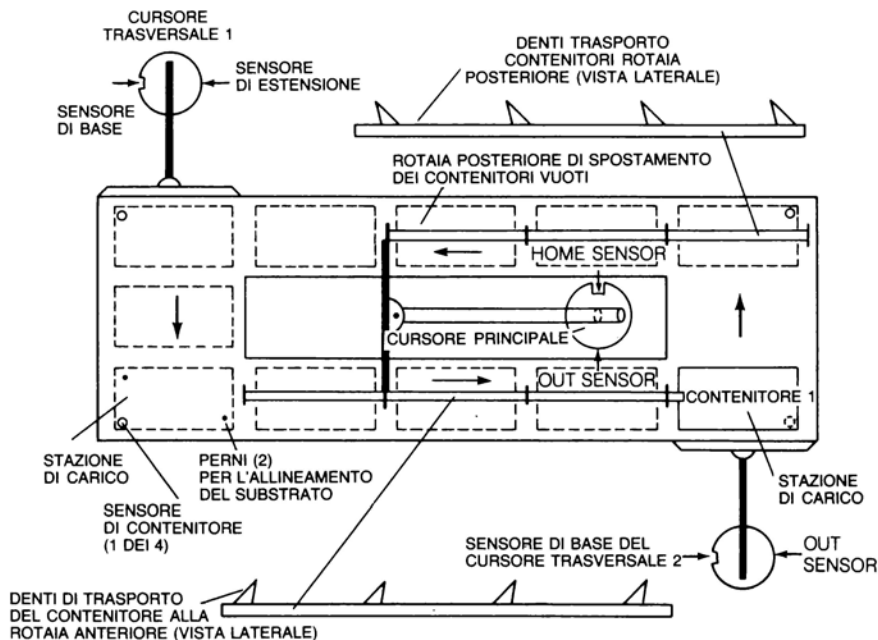
Come meccanismo di trasporto è stato scelto un meccanismo a movimento alternativo, qui di seguito chiamato cursore, per avere stazioni multiple pur mantenendo una facilità di accesso ai componenti e ridotte dimensioni di macchina. Il meccanismo di trasporto è un sottosistema della macchina di saldatura a riflusso, ma il software è previsto in modo che il controllo del trasporto possa essere effettuato separatamente dal resto della macchina. In *Figura 10-11* è rappresentato un disegno schematico dall'alto del sistema di trasporto con punti di I/O richiesti per controllarlo.
Alla stazione di carico, un cursore sposta un contenitore metallico vuoto dalla rotaia posteriore alla posizione di carico sulla rotaia anteriore. Questo contenitore di trasferimento riceve un substrato alla stazione di carico, e dei perni di posizionamento presenti nel contenitore ne assicurano il corretto allineamento. Il cursore principale aziona un meccanismo a denti che fa spostare i contenitori carichi lungo la rotaia anteriore dalla stazione di carico alle stazioni di lavoro in direzione della stazione di scarico. Dopo che un sottoassieme completo viene tolto dal contenitore nella stazione di scarico, un altro cursore sposta il contenitore vuoto sulla rotaia posteriore. Il cursore principale allora fa ritornare i contenitori vuoti lungo la rotaia posteriore verso l'estremità della stazione di carico, in modo circolare. Ai quattro angoli del sistema di trasporto sono previsti dei sensori per assicurare che non si verifichino degli inceppamenti in caso di funzionamento scorretto, e dei sensori di posizione in corrispondenza a ciascuna camma del cursore rilevano la posizione di riposo (posizione di base) e la posizione estesa di ciascun meccanismo a cursore.

Software

La *Figura 10-12* mostra il diagramma di flusso e le istruzioni necessarie per programmare lo spostamento di un cursore trasversale alternativo. I programmi per gli altri cursori sono simili.

Controllo degli errori

La routine di controllo degli errori meccanici sorveglia i flag e i temporizzatori per arrestare la macchina se si verificano funzionamenti scorretti. Affinché il sistema di trasporto funzioni regolarmente, tutte le stazioni di montaggio devono essere libere dal meccanismo a cursore e in posizione di riposo. Ogni stazione ha un flag che viene portato a 1 o resettato a 0 per indicare se è in funzione o in riposo. Il software di controllo del sistema di trasporto verifica che tutti questi flag siano nello stato 0 per

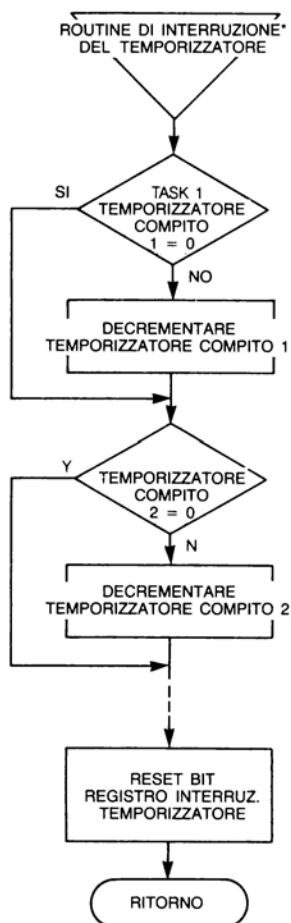
assicurare che tutte le stazioni siano in riposo prima di mettere in funzione qualsiasi motore. Quando uno dei motori del meccanismo alternativo è avviato, il normale funzionamento farà sì che il motore ruoti sino a quando il suo sensore di posizione, che indica il completamento di un ciclo, lo fa arrestare. Se il meccanismo alternativo si inceppa per qualche motivo, e pertanto il sensore di posizione non entra in funzione, una routine di temporizzazione fa arrestare il motore.

a. Vista dall'alto del sistema di trasporto dei contenitori

Output	Input
Avviamento del cursore principale Arresto del cursore principale Avviamento del cursore trasversale 1 Avviamento del cursore trasversale 2 Avviamento motore a passi dei denti Conteggio 0 del motore a passi dei denti Conteggio 1 del motore a passi dei denti Conteggio 2 del motore a passi dei denti Conteggio 3 del motore a passi dei denti	Cursore principale in posizione di base Cursore principale in estensione Cursore trasversale 1 in posizione di base Cursore trasversale 1 in estensione Cursore trasversale 2 in posizione di base Cursore trasversale 2 in estensione Denti sollevati Denti abbassati Motore a passi dei denti impegnato Posizione 1 del contenitore Posizione 2 del contenitore Posizione 3 del contenitore Posizione 4 del contenitore

b. I/O per il sistema di trasporto

Figura 10-11. Sistema di trasporto dei contenitori

Figura 10-12. Routine per il cursore trasversale 1

La routine di temporizzazione, mostrata sotto forma di diagramma di flusso in *Figura 10-13*, entra in funzione ogniqualvolta viene iniziata un'operazione; lascia trascorrere un tempo sufficiente per il normale completamento dell'operazione, e se questo tempo trascorre senza che un particolare segnale di sensori indichi il termine dell'operazione, genera un segnale di errore di superamento di tempo che fa arrestare il funzionamento e richiama l'attenzione dell'operatore.

*L'interruzione è prodotta da un'interruzione dell'orologio dell'hardware

a. Diagramma di flusso

Figura 10-13. Routine di temporizzazione

Le posizioni di memoria RAM per ciascuna routine di controllo di funzionamento sono caricate con l'opportuno valore di tempo quando viene iniziata la corrispondente routine di funzionamento, e l'output di un oscillatore a frequenza costante è collegato ad una linea di interruzione del microcalcolatore. Ogniqualvolta si verifica un'interruzione, una routine di servizio di interruzione verifica il valore del contatore. Se è diverso da 0, il valore viene diminuito da 1 e la linea di interruzione viene resettata, e questa sequenza continua sino a quando la routine di tempificazione viene resettata dal completamento dell'operazione o il contatore raggiunge lo 0. La routine di controllo dell'operazione verifica lo stato di questo contatore a software durante il suo funzionamento, e se viene letto uno 0 indica un errore di eccesso di tempo e il software di controllo di errore entra in funzione per arrestare il funzionamento della macchina.

STAZIONE DI CARICO

La *Figura 10-14* mostra un disegno in vista laterale della stazione di carico. L'operazione consiste nel caricare un substrato flessibile da un alimentatore, rifornito dall'operatore, in uno dei contenitori per le operazioni di montaggio. Una volta che il substrato è correttamente caricato, le tolleranze per le operazioni di montaggio sono assicurate dalle regolazioni iniziali della macchina.

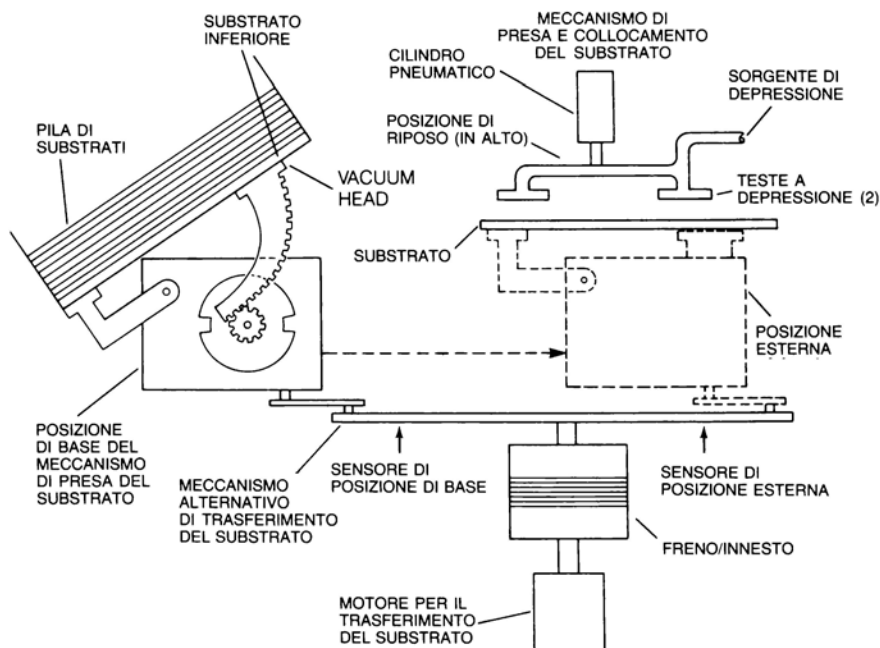



Figura 10-14. Stazione di carico del substrato

Dapprima la testa a depressione del dispositivo di presa dei substrati viene sollevata verso il fondo della pila di substrati. La testa a depressione prende un substrato dal fondo della pila e quindi la testa e il substrato vengono abbassati. Successivamente il meccanismo di trasferimento del substrato sposta il dispositivo di presa (sulla destra in *Figura 10-14*) sino a quando il substrato è correttamente disposto sotto il dispositivo di presa e collocamento. Questo dispositivo viene abbassato e le sue due teste a depressione afferrano il substrato e lo sollevano dalla testa di presa, alla quale ora è stata tolta la depressione.

Il meccanismo alternativo di trasferimento del substrato riporta il dispositivo di presa del substrato (a sinistra) nella sua posizione di riposo, per prelevare un altro substrato dalla pila. Appena è stato riportato indietro, il cursore trasversale del meccanismo di trasporto (considerato in precedenza) porta un contenitore vuoto sotto il dispositivo di presa e collocamento del substrato, che abbassa il substrato sui perni di allineamento del contenitore vuoto per completare l'operazione di carico. Il dispositivo di presa e collocamento quindi viene sollevato alla sua posizione di riposo per liberare il contenitore e prepararsi per la presa del successivo substrato.

Questa procedura apparentemente semplice richiede l'interazione di un certo numero di componenti del sistema. Per esempio, il dispositivo di presa del substrato e il meccanismo a cursore trasversale devono occupare lo stesso spazio in tempi differenti del processo. Poiché i due meccanismi non possono trovarsi contemporaneamente nello stesso posto, la routine di controllo deve temporizzare opportunamente gli spostamenti in modo da prevenire una loro collisione. Tutti gli assiemi meccanici operano in modo completamente indipendente uno dall'altro, ma vengono sincronizzati dalla routine di controllo; una loro sincronizzazione con metodi meccanici avrebbe richiesto una progettazione molto complessa con leve, ingranaggi e pulegge. Questo pone in evidenza come un controllo programmabile a software può ridurre la complessità e il numero dei controlli meccanici.

La *Figura 10-15* mostra i diagrammi di flusso per il software che sincronizza l'interazione fra il trasferimento del substrato e il trasporto principale. Si noti come i flag sono impostati o azzerati da una routine e verificati dall'altra prima dell'avanzamento al passo successivo. Le routine di lettura dei flag operano in ciclo chiuso per controllare costantemente lo stato di un flag. Non appena il flag viene settato o resettato, secondo le necessità, la routine di controllo avanza. Pertanto per ciascuna operazione possono essere scritti moduli di software indipendenti che operano con la rapidità consentita dalla macchina. In questo caso il software è efficiente, poiché è capace di operare molto più rapidamente dell'hardware meccanico.

Le due stazioni che determinano i limiti di tempo di ciclo di queste macchine sono la stazione di carico del substrato e la stazione di collegamento della tastiera. Qualsiasi cosa che possa essere fatta per ridurre il tempo di ciclo in queste due stazioni può incrementare la velocità della macchina rendendola economicamente più vantaggiosa. Un'azione utile consiste nel far operare il meccanismo di presa del substrato in modo che esso prenda un substrato dalla pila mentre il contenitore viene caricato con il substrato precedente.
In questo modo il meccanismo di presa del substrato sarà pronto a spostarsi a destra non appena il contenitore caricato viene allontanato dalla stazione di carico, e si può risparmiare circa mezzo secondo sul tempo di trasporto.

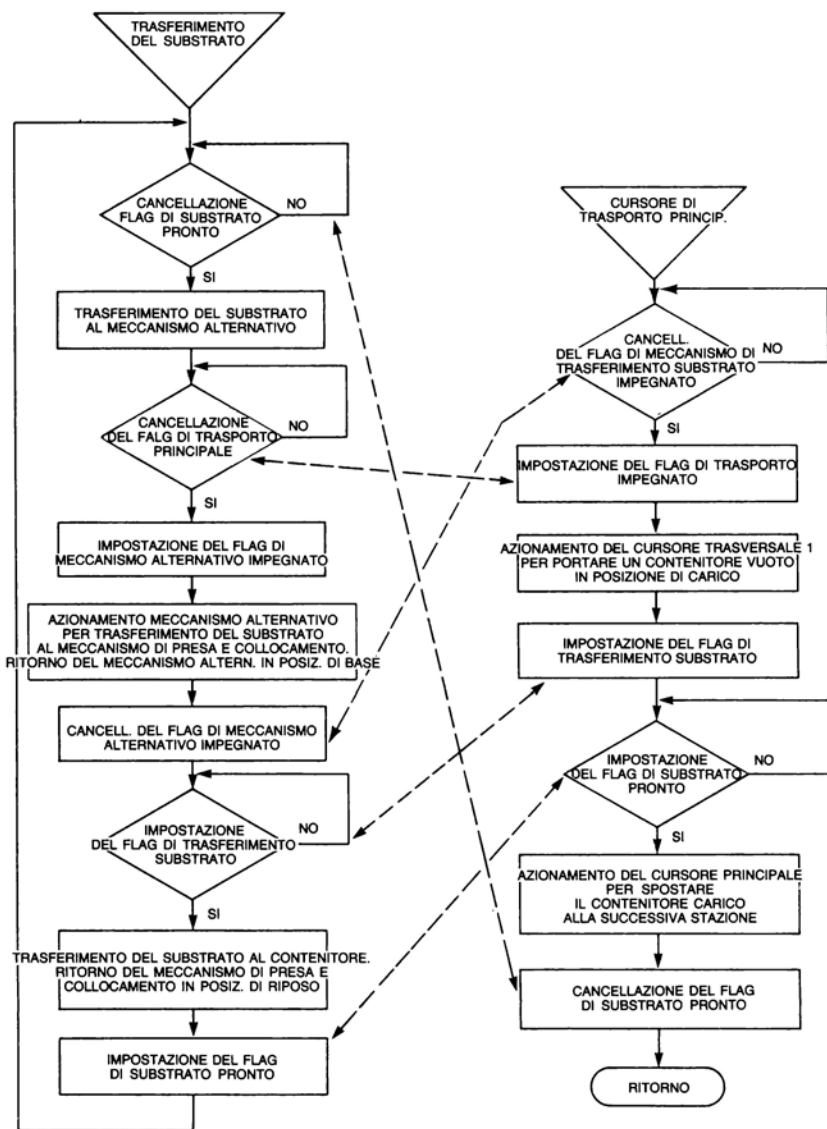



Figura 10-15. Trasferimento di substrato e interazioni con il sistema di trasporto principale

STAZIONE DI APPLICAZIONE DEL FONDENTE

In questa stazione al substrato viene applicato un fondente di saldatura che opera come agente di pulitura e bagnatura. Il processo di applicazione del fondente richiede un attuatore a cilindro pneumatico per estendere e ritrarre il tampone del fondente. Il cilindro è controllato da una valvola a solenoide, e due sensori di posizione indicano se il tampone del fondente è in posizione di riposo o in posizione estesa.

Il diagramma di flusso e le istruzioni codificate perché il programma di controllo faccia funzionare questa stazione sono mostrati in *Figura 10-16*. Si noti che la routine imposta un flag appena prima del ritorno al programma principale, per indicare che l'operazione è stata compiuta senza errori. Il funzionamento della routine è consentito dal programma della sequenza di controllo che tiene conto delle richieste dell'operatore e verifica se nella macchina sono avvenuti degli errori.

STAZIONE DI COLLEGAMENTO DEL CIRCUITO INTEGRATO

La stazione di collegamento del circuito integrato è mostrata in *Figura 10-17a*. Questa stazione richiede due separati pezzi di harware: il manipolatore dei circuiti integrati, che consente alla macchina di avere uno stock di circuiti integrati per un funzionamento prolungato, e il meccanismo di presa e collocamento.

Il rifornimento dei circuiti integrati viene effettuato da un'unità girevole a carosello che può manipolare vari tubi di circuiti integrati, cosicché l'operatore non deve ricaricare il carosello frequentemente. Per l'alimentazione viene usato un meccanismo a scappamento, e l'estremità inferiore di questo meccanismo è mostrata in *Figura 10-17b*. Il funzionamento dello scappamento è tale che soltanto un circuito integrato alla volta può essere alimentato dal carosello e l'alimentazione avviene con l'orientamento adatto per il meccanismo di presa e collocamento. Il software del carosello assicura che sia sempre presente un circuito integrato per il meccanismo di presa e collocamento.

Un gruppo a camma e inseguitore di camma azionato da un motore a passi fornisce il movimento per prendere un circuito integrato dal braccio di alimentazione del meccanismo di scappamento e collocarlo sul substrato. Quando il circuito integrato è a posto sul substrato, l'elemento riscaldatore e un morsetto sono azionati da due cilindri pneumatici controllati da valvole a solenoide per fornire il calore e la pressione necessari per il processo di saldatura a riflusso. Il braccio di presa e collocamento, il morsetto e il riscaldatore sono mostrati in *Figura 10-17b*. La pressione d'aria nel cilindro di bloccaggio è regolabile in modo da fornire la necessaria pressione meccanica durante il processo di saldatura. Sensori di pressione di temperatura forniscono una retroazione per il sistema di controllo per assicurare il corretto funzionamento della stazione. Due anelli di controllo a software forniscono il controllo per la stazione di collegamento del circuito integrato: uno per il funzionamento del carosello e l'altro per l'operazione di presa e collocamento del circuito integrato. I due anelli operano indipendentemente e in parallelo fra loro, in modo da ottenere un più rapido funzionamento di macchina. L'interazione risultante dal funzionamento in parallelo si avvale di flag di stato cosicché ogni routine può determinare lo stato dell'altra, come descritto per l'operazione di carico del substrato.

a. Diagramma di flusso

```
        COC   @FLUX2       È presente il componente?
              @STAFLAG*
        JNE   FLUX20       Se no, lasciare
        SBO   FLUXBIT      Se si, azionare l'applica-
                           zione di fondente
        LI    R9, FLUX10   Indirizzo puntatore contr.
                           progr.
        LI    R10, DLY     Ritardo di tempo
FLUX10  TB    FLUXOT       Dispensatore azionato
        JNE   FLUX20       Se no, lasciare
        MOV   R10, R10     Verificare supero tempo
        JEQ   ERROR        Se scaduto, errore
        B     FLUX20       Altrimenti lasciare
        LI    R9, FLUX12   Impostare controllore
                           progr.
        LI    R10, T3DLY   Impostare dispensatore
FLUX12  MOV   R10, R10     Verificare ritardo
        JNE   FLUX20       Se no, lasciare
        SBZ   FLUXBIT      Se si, sollevare
        LI    R9, FLUX15   Dispensatore
        LI    R10, DLY     Tempo di ritardo
FLUX15  TB    FLUXHM       Se in riposo, eseguito
        JEQ   FLUX19
        MOV   R10, R10     Verificare temporizzatore
        JEQ   ERROR        Se 0, vi è un errore
        JMP   FLUX20       Altrimenti lasciare
FLUX19  SETO  FLUXFLG      Uscita normale
FLUX20  RTWP               Uscita temporanea
```

*Istruzione accatastata per risparmiare spazio

b. Istruzioni codificate

Figura 10-16. Programma della stazione di applicazione del fondente

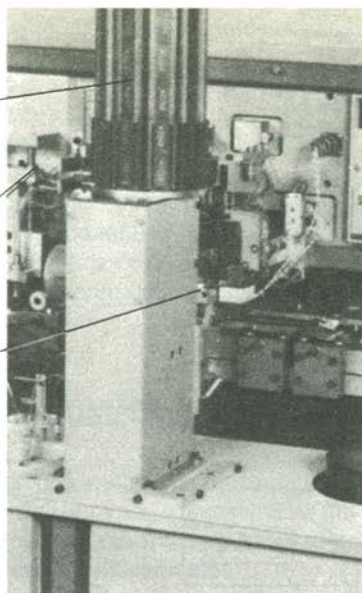
a. Vista d'assieme

b. Dettaglio del meccanismo di presa e collocamento

Figura 10-17. Stazione di collegamento del circuito integrato

STAZIONI DI APPLICAZIONE DEL FONDENTE E DI COLLEGAMENTO DELLA TASTIERA

Queste stazioni richiedono gli stessi passi del collegamento del circuito integrato; le differenze riguardano le dimensioni e la forma della tastiera e il modo in cui essa viene manipolata.

FUNZIONI DIAGNOSTICHE DI MANUTENZIONE

Questa macchina effettua due funzioni per facilitare la ricerca dei guasti. Anzitutto è prevista una separata routine di software che consente all'operatore di verificare lo stato di tutti i sensori della macchina per mezzo di sedici luci di stato e un commutatore rotativo. I sensori sono collegati a gruppi in modo tale che i loro output possano essere commutati in sequenza a una porta di input del controllore. Ogni porta di input è identificata da un particolare indirizzo, e regolando il commutatore rotativo sul corretto indirizzo della porta l'operatore può verificare sino a 16 sensori disponibili in quella porta; spostando il commutatore su un'altra porta può quindi verificare lo stato di altri 16 sensori. La routine di software aggiorna continuamente lo stato dei sensori, che viene indicato mentre la macchina è in funzione. La routine è prevista in modo da operare continuamente, e può essere usata mentre la macchina funziona normalmente o esclusivamente per la ricerca di guasti.
La seconda funzione è la possibilità di impostare un modo di funzionamento nel quale è attiva soltanto una stazione. Oltre al normale funzionamento della stazione prescelta, può essere usato uno speciale commutatore a passi per far compiere alla stazione un movimento alla volta. Questo consente di fermare la macchina nei punti critici per controllare l'allineamento delle parti e per verificare se vi sono determinati inconvenienti. Quando si opera in modo diagnostico è possibile escludere alcune routine di errore per evitare che esse arrestino il funzionamento della macchina.

INPUT/OUTPUT DI OPERATORE

Oltre al pannello coi commutatori di controllo che servono per far funzionare la macchina, vi è un terminale separato per indicare quale errore si è verificato, per esempio un superamento di tempo. Questo terminale fornisce anche un mezzo per immettere il tempo di riscaldamento, il tempo di raffreddamento, ecc. per i processi accessori, e per fornire dati di produzione sul numero di assiemi costruiti, sul tempo di funzionamento, sul tempo passivo e sul tempo di guasto, ecc. Queste informazioni sono disponibili anche al punto centrale di controllo del sistema completo e possono essere stampate per fini di documentazione.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. L'uso di un microcalcolatore come controllore in un sistema di automazione permette di semplificare la parte meccanica del progetto e di variare le funzioni degli attuatori agendo unicamente sul software senza richiedere una riprogettazione della parte meccanica.
2. Un processo che viene considerato per un'automazione deve essere ben compreso, e i requisiti del sistema devono essere ben specificati prima di iniziare la progettazione del sistema di automazione.
3. Quando si sceglie un controllore per automazione, oltre ai requisiti di sistema occorre considerare: il costo, la disponibilità di un servizio di manutenzione, il linguaggio di programmazione da usare e il supporto per il software.
4. I diagrammi di flusso per il funzionamento della macchina sono molto utili per sviluppare il codice di programmazione per il software di controllo.
5. Un sottoprodotto di un sistema di automazione è la facoltà di verificare e riportare lo stato della macchina e dei vari parametri del prodotto realizzato.
6. Quando si sceglie l'hardware del controllore, il metodo più efficace consiste nell'adottare componenti già disponibili sul mercato e nell'integrarli fra loro per costituire un sistema. I vantaggi sono: minor costo, minor tempo di sviluppo, provata affidabilità e interfacce compatibili.
7. Generalmente, un controllore a microcalcolatore include in un microprocessore o un microcalcolatore a chip singolo, una memoria, parte di input e output per il controllo della macchina e di unità periferiche, e un'interfaccia di comunicazione.
8. Un software strutturato consente di suddividere il programma in piccoli moduli con interfacce ben definite. Ciò permette a differenti programmatori di sviluppare indipendentemente i moduli del software pur ottenendo dei moduli in grado di operare correttamente fra loro. Sovente alcuni moduli possono essere usati anche per altre applicazioni con pochi o nessun cambiamento.
9. Un sistema operativo è un programma a software che fa cooperare fra loro nel corretto ordine tutte le componenti del sistema.
10. Un blocco di controllo di funzione è un blocco di informazioni che comunica al sistema operativo una particolare subroutine.
11. Il funzionamento della routine di controllo decide quale programa applicativo far funzionare in ogni momento. I programmi applicativi sono quelli che controllano la macchina in modo che essa effettui taluni compiti.
12. Uno svolgimento intercalato dei compiti migliora il tempo di impiego della CPU. Per questo tipo di funzionamento vengono usati dei flag per determinare quale parte di un certo compito occorre svolgere in ogni particolare momento.
13. Un flag è un bit in una posizione di registro o di memoria che indica una particolare condizione, a seconda che sia impostato a 1 o resettato a 0.
14. Una routine di servizio di unità è un'interfaccia di input/output fra il programma applicativo e un'unità periferica come un display a raggi catodici o una stampatrice. Permette la semplificazione dei programmi applicativi, dato che il programma applicativo si limita a leggere o scrivere in particolari buffer e la routine di servizio di unità svolge il resto dell'operazione di input/output.
15. Gli errori di macchina sono rilevati mediante un software che controlla lo stato di flag azionati da temporizzatori o da sensori. Se un particolare flag non è impostato

o azzerato quando dovrebbe esserlo, o se un temporizzatore di operazione segnala un supero di tempo, viene indicato un errore.

16. Nella macchina dell'esempio, le operazioni meccaniche erano svolte indipendentemente, ma erano sincronizzate a software mediante un flag di stato. In questo modo è stato possibile eliminare complessi sistemi meccanici di sincronizzare impieganti leve, ingranaggi e pulegge.
17. Il software diagnostico è molto utile per trovare i guasti di macchina. La macchina dell'esempio aveva sia un normale modo diagnostico di funzionamento sia un modo con avanzamento passo a passo.

Quiz per il Capitolo 10

1. La maggior parte delle applicazioni di controllo industriale:
- **a.** può essere risolta usando più di un metodo di controllo.
- **b.** richiede un'attenta descrizione del problema.
- **c.** può essere resa più affidabile usando sistemi a stato solido.
- **d.** deve avere il processo opportunamente specificato per operare in modo corretto.
- **e.** tutto quanto sopra.

2. Per trasferire programmi a un sistema centrale è possibile:
- **a.** impostare commutatori di bit sulla CPU centrale.
- **b.** trascrivere il programma in PROM e installare queste PROM nel sistema.
- **c.** sviluppare il programma soltanto sulla base di un sistema reale.
- **d.** tutto quanto sopra.

3. Un sistema operativo:
- **a.** è necessario per far funzionare un sistema a microprocessore.
- **b.** fornisce una struttura con la quale sviluppare i programmi applicativi.
- **c.** è utile poiché consente di usare moduli standard.
- **d.** "b" e "c".
- **e.** tutto quanto sopra.

4. Un sistema operativo:
- **a.** può ridurre il tempo di sviluppo del software.
- **b.** è inutile nella maggior parte delle applicazioni di controllo.
- **c.** consente ad altri programmatori di comprendere la struttura di un software.
- **d.** tutto quanto sopra.
- **e.** nulla di quanto sopra.

5. L'automazione:
- **a.** aumenta i costi di montaggio.
- **b.** diminuisce la produzione.
- **c.** permette di effettuare operazioni difficili.
- **d.** aumenta il numero di operai.
- **e.** tutto quanto sopra.

6. Il tempo di esecuzione del programma:
- **a.** deve essere più lento della più veloce operazione meccanica da controllare.
- **b.** varia in funzione del tipo di linguaggio utilizzato.
- **c.** non può essere cambiato dopo che il programma è stato scritto.
- **d.** tutto quanto sopra.

7. L'uso di un microcalcolatore come controllore consente:
- **a.** un hardware meccanico più semplice.
- **b.** un tempo di ciclo più breve.
- **c.** maggiori capacità autodiagnostiche sul funzionamento della macchina.
- **d.** tutto quanto sopra.

8. I prodotti standard per il controllo a calcolatore:
- **a.** sono disponibili già pronti sul mercato.
- **b.** sono molto costosi e non valgono il loro prezzo.
- **c.** non esistono ancora.
- **d.** nulla di quanto sopra.

9. La temporizzazione usando un microcalcolatore TM990:
- **a.** richiede un temporizzatore esterno che deve essere aggiunto dall'utente.
- **b.** è disponibile sulla scheda standard della CPU.
- **c.** può essere ottenuta mediante software.
- **d.** "b" e "c" sopra.
- **e.** nulla di quanto sopra.

10. I controllori a calcolatore:
- **a.** dovrebbero essere costruiti in modo modulare, ogniqualvolta ciò sia possibile.
- **b.** sono molto difficili da cambiare.
- **c.** sono molto flessibili.
- **d.** "a" e "c" sopra.
- **e.** nulla di quanto sopra.

CAPITOLO 11

TENDENZE PER IL FUTURO E AFFIDABILITÀ

IN QUESTO CAPITOLO

Questo capitolo riguarda le tendenze sull'uso dei microprocessori per fini di automazione e la loro affidabilità. Entrambi gli argomenti rivestono una grande importanza quando si considera il futuro dell'automazione.

RASSEGNA RETROSPETTIVA

Lo studio dell'evoluzione del controllo dell'automazione industriale rivela che i problemi critici di controllo sono stati sempre risolti usando il metodo più affidabile ed economico disponibile al momento. Il metodo scelto spesso non ha fatto uso delle tecnologie più recenti, perché queste solitamente erano più costose e non avevano una affidabilità provata.
Quando i calcolatori vennero per la prima volta introdotti nei sistemi di produzione automatica, il loro costo era elevato e le capacità erano molto limitate rispetto a quelle odierne. La memoria, in particolare, era costosa e voluminosa. La memoria a nuclei magnetici era l'unico tipo di memoria ad accesso casuale disponibile, e il suo costo era circa di 800 lire per un byte di 8 bit. Attualmente le memorie si presentano in un modo molto differente, poiché vengono ampiamente utilizzati circuiti integrati a semiconduttori. Queste nuove memorie richiedono meno spazio, e in elevate quantità costano meno di 1,5 lire per byte. A causa dell'alto costo e del notevole ingombro dei calcolatori e delle loro memorie, le prime macchine avevano dei processori centrali di controllo che usavano programmi in linguaggio assembly.

CONTROLLO DISTRIBUITO

Con il basso costo e le ridotte dimensioni dei processori e delle memorie a circuiti integrati, e con gli enormi progressi nelle prestazioni dei componenti, particolarmente dei microcalcolatori programmabili, il sistema di elaborazione a controllo centrale non è più necessario. Ora l'enfasi è sul calcolo distribuito, e vengono introdotti dei controllori programmabili che utilizzano i concetti del calcolo distribuito. In futuro, solo eccezionalmente non verrà usato un calcolo distribuito.

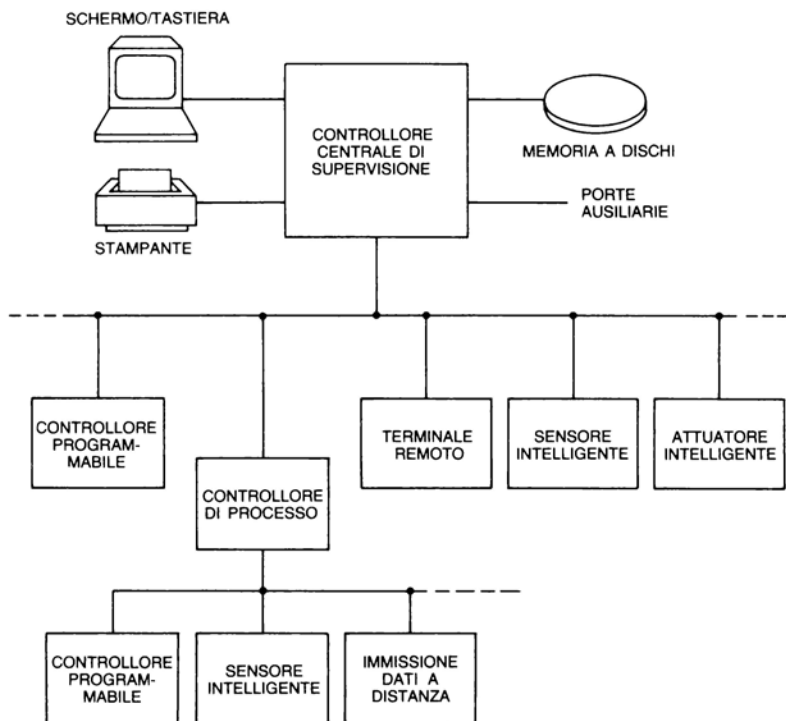



Figura 11-1. Sistemi di controllo distribuito

Nel controllo distribuito il controllore e il programma di controllo sono posti molto vicino al punto da controllare, e ciò è reso possibile soprattutto dalle migliori capacità funzionali dei componenti a circuiti integrati. Attualmente sono disponibili microcalcolatori su chip singolo che hanno le stesse capacità di un sistema che venti anni or sono occupava un intero locale. Sono inoltre disponibili componenti di interfaccia che manipolano input e output digitali, e sullo stesso chip includono anche contatori e temporizzatori interni, RAM e ROM di programma. Alcune ROM hanno una capacità sufficiente per contenere programmi, memorizzati in dispositivi a stato solido, che consentono al sistema di svolgere programmi scritti nel linguaggio BASIC di alto livello.
Avvicinando il sistema di controllo al punto controllato non è più necessario far correre un fascio di fili dai sensori e dagli attuatori verso un processore centrale; sono sufficienti pochi cavi che collegano i punti di controllo distribuito con il controllore centrale di supervisione. In un sistema di controllo distribuito puro, se la rete di collegamento fosse interrotta i singoli anelli di controllo continuerebbero a funzionare, poiché tutti i requisiti di controllo per una particolare funzione vengono svolti localmente, cioè vicino alla macchina o al processo che viene controllato. Il controllore centrale di supervisione non

svolge l'effettivo compito di controllo, ma si limita a schedulare i compiti e a comunicare i dati e lo stato del sistema ai tecnici di controllo del processo e ai tecnici di fabbricazione. L'unico collegamento fisico è un cavo di comunicazione digitale fra il controllore centrale e i controllori locali.
La *Figura 11-1* mostra un tipico sistema di controllo industriale distribuito. I cavi di comunicazione, chiamati bus, usano un protocollo di segnali chiamato struttura di bus standard; questo protocollo è tale da consentire, idealmente, l'aggiunta di qualsiasi livello di controllo permettendo a tutti i sottosistemi intelligenti (considerati in seguito) di comunicare fra loro.
Un altro cambiamento che probabilmente presto si verificherà riguarda l'uso di cavi e fibre ottiche, anziché cavi metallici, per la trasmissione di segnali fra il controllore centrale e i controllori distribuiti. I cavi a fibre ottiche sono già usati nei sistemi di telefonia e in altre applicazioni, e hanno dimostrato di avere vantaggi come la riduzione delle interferenze a radio frequenza ed elettromagnetiche, un elevato isolamento di tensione e l'alimentazione di anelli di terra.
L'ostacolo principale per l'uso pratico di fibre ottiche per il controllo industriale è lo sviluppo di ricevitori ottici veloci e a basso costo.

SENSORI E ATTUATORI

Sensori intelligenti

Un ulteriore sviluppo del controllo distribuito sarà l'impiego di sensori intelligenti. Con l'aumentare delle capacità dei componenti a semiconduttore, la possibilità di combinare un'elaborazione analogica e un'elaborazione digitale sullo stesso substrato semiconduttore permetterà di ottenere output digitali dai sensori; verrà così aumentata la loro sensibilità e immunità dal rumore e la loro facilità di accoppiamento con il controllore. Questo viene già fatto, per esempio, con molti voltmetri digitali dove un complesso misuratore – dell'input analogico di tensione al controllo del visualizzatore – viene realizzato su un singolo circuito integrato. Questa capacità verrà ulteriormente espansa nell'ambito del controllo industriale per consentire la programmazione del chip per una specifica applicazione e per l'input dai sensori.

Sensori a stato solido

Sensori a punto di rugiada

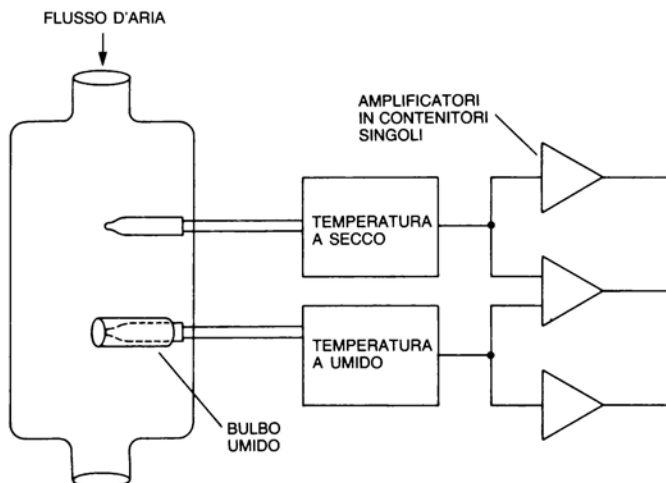
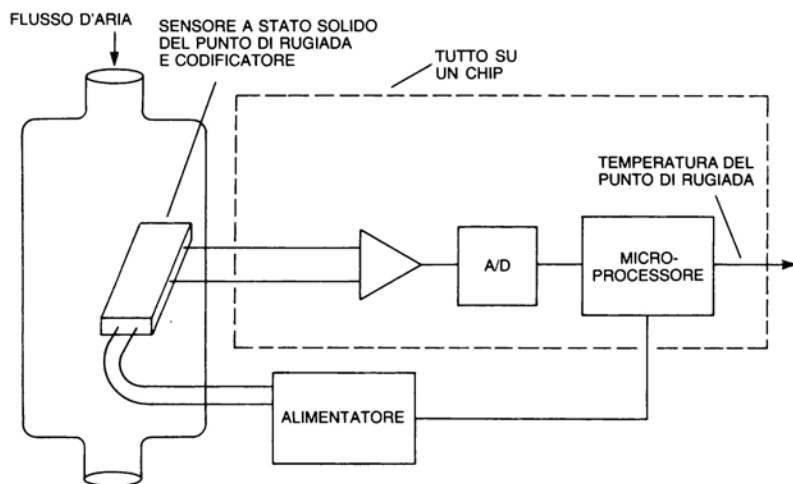
Negli ultimi anni sono cominciati ad apparire dei sensori a stato solido, come il sensore piezoresistivo di pressione menzionato nel Capitolo 3, e il numero dei tipi disponibili continuerà ad aumentare. Verrà ora analizzato uno psicrometro a stato solido che viene usato per misurare il punto di rugiada di un'atmosfera. Il sensore consiste di un dispositivo di raffreddamento a stato solido, di un elemento sensibile alla temperatura e di un elemento capacitivo sensibile all'umidità. Quando il dispositivo si raffredda e raggiunge il punto di rugiada, l'umidità condensa e la capacità cambia. Questo cambiamento segnala al sistema di campionare l'uscita del sensore per calcolare la temperatura. In futuro, all'assieme del sensore potrebbe essere aggiunto un microprocessore per calcolare l'effettiva temperatura del punto di rugiada, e l'uscita digitale di questo sensore

a. a. Sensore a componenti discreti

b. Sensore "intelligente" a stato solido

Figura 11-2. Futuri sensori integrati a stato solido e attuali sensori di tipo discreto

intelligente potrebbe essere collegata al controllore mediante un cavo a fibra ottica. Il nuovo metodo contrasta con il vecchio metodo di *Figura 11-2*. Il sensore è chiamato "intelligente" poiché ha la capacità di calcolare la temperatura al punto di rugiada e di fornire questo dato in un formato standard tale da poter essere rilevato direttamente da un operatore o da un elemento di calcolo.

Sensore di flusso gassoso

La misurazione del flusso di un gas è un'altra applicazione per sensori a stato solido. Come mostrato in *Figura 11-3*, questo dispositivo è costituito da tre transistori realizzati su un substrato comune che viene posto nel flusso gassoso. Le due unità esterne sono sensori di temperatura, e l'unità centrale è un riscaldatore. La differenza di temperatura misurata dai due sensori è funzione del flusso di gas, e un microprocessore integrato può usare un programma incorporato per calcolare il flusso di gas in modo che l'output del sensore a stato solido sia un flusso di bit digitali che indicano il flusso gassoso nelle unità assolute usate dal tecnico di controllo.

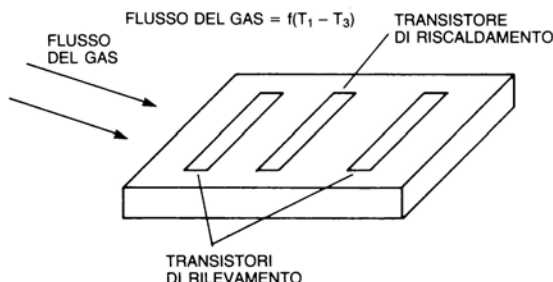



Figura 11-3. Sensore di flusso gassoso a stato solido

Attuatori intelligenti

Gli attuatori a controllo analogico attualmente usano un anello di corrente che porta un segnale di controllo proporzionale proveniente dal controllore, e un controllo analogico previsto nell'attuatore stesso trasforma il segnale dell'anello di corrente nel reale movimento dell'attuatore.
Usando tecniche digitali e un microprocessore programmabile integrato con l'attuatore si può calcolare la risposta di posizione dell'attuatore a un segnale, e si può convertire la trasmissione dei dati in un flusso di bit digitali seriali. In questo caso il controllore programmabile deve fornire soltanto informazioni di posizione, e l'attuatore intelligente controllerà il resto dell'anello di controllo e la posizione stessa.

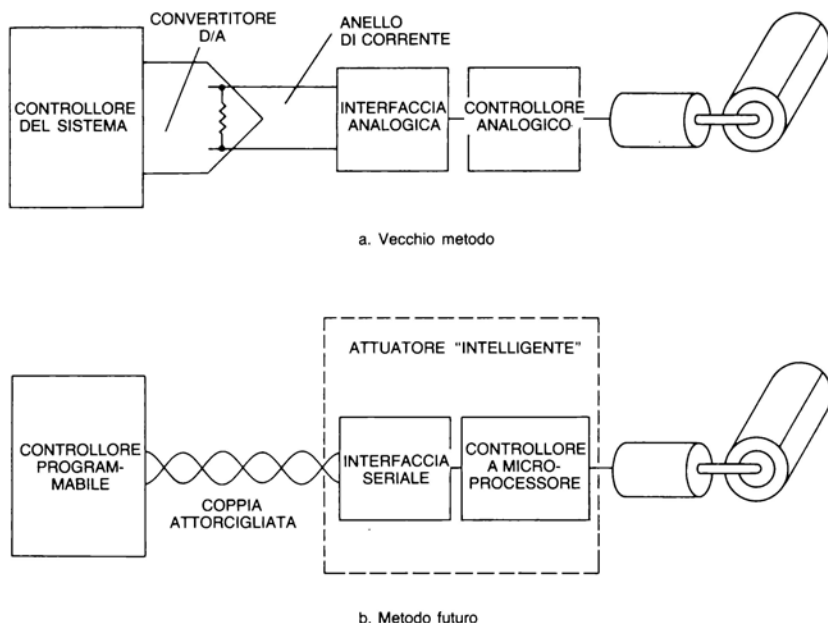



Figura 11-4. Interfaccia di attuatore

Inoltre, se un attuatore intelligente è in grado di rilevare la propria posizione,può anche rispondere direttamente a un comando assoluto emesso dal processo centrale. Per esempio, in un sistema convenzionale per ottenere un certo valore di flusso il controllore deve azionare l'attuatore di controllo rilevando l'output del sensore di misurazione del flusso sino a quando viene ottenuto il valore desiderato. Interfacciando direttamente un attuatore intelligente con un sensore intelligente, il controllore dovrà soltanto comunicare l'entità di flusso all'attuatore; i calcoli e le regolazioni di controllo del flusso verranno fatti direttamente dall'attuatore intelligente. Così, l'unica funzione del controllore centrale consisterà nel trasmettere le condizioni desiderate e nel verificare lo stato dell'unità periferica. La *Figura 11-4* mostra la differenza fra le attuali interfacce di attuatore e quelle che verranno usate in futuro.

Trasmissione di dati

Gli attuatori e i sensori intelligenti potrebbero avere un indirizzo e venire indirizzati come le posizioni di memoria. Ciò consentirebbe loro di utilizzare uno stesso bus per la trasmissione di dati e comandi. Il controllore emetterebbe l'indirizzo del particolare

attuatore desiderato nonché i dati ad esso destinati, e soltanto quell'attuatore porrebbe in funzione il suo ricevitore per ricevere i dati. Anche un sensore verrebbe indirizzato in modo analogo, ogniqualvolta il controllore avesse necessità di conoscere il suo output. Questa tecnica di indirizzamento ridurrebbe notevolmente la quantità di collegamenti elettrici nel sistema di controllo.
Gli output di questi sensori e gli input di questi attuatori saranno un flusso di bit digitali, e pertanto sarà possibile effettuare operazioni sul flusso di bit per rivelare gli errori prodottisi nella trasmissione. In questo modo non soltanto si potrà rilevare un errore, ma sarà anche possibile correggerlo utilizzando un codice di ridondanza ciclica (CRC). Il codice di ridondanza ciclica è una serie di bit addizionali opportunamente correlati con un blocco di dati che è pronto per essere trasmesso, e tale codice viene quindi trasmesso con il blocco di dati.
Nel ricevitore viene usato lo stesso metodo per generare un codice di ridondanza ciclica basato sui dati ricevuti, e questo codice viene confrontato con il codice di ridondanza ciclica trasmesso; se i due codici non corrispondono vuol dire che c'è un errore. Con un semplice algoritmo è possibile ricostruire dati in forma corretta anche se si sono verificati vari errori. Questa tecnica è già usata in alcune applicazioni di comunicazione di dati, e la sua applicazione nel controllo industriale assicurerà una trasmissione più affidabile anche in presenza di disturbi elettrici.

CONTROLLORE PROGRAMMABILE

La capacità dei futuri controllori programmabili aumenterà in misura notevole. Saranno più facili da usare e più flessibili, e l'aggiunta di moduli periferici intelligenti programmabili e controllabili con il programma del controllore principale aumenterà notevolmente la libertà di progettazione.
La possibilità di svolgere numerosi compiti e di controllare un certo numero di processi in modo contemporaneo renderà il controllore programmabile più simile a un microcalcolatore. Vi sarà tuttavia una differenza nella natura dedicata del linguaggio usato con il controllore. Il controllore programmabile sarà molto più facile da usare, poiché ogni controllore sarà dedicato alla soluzione di uno specifico problema di controllo industriale. La possibilità di creare sistemi di controllo dotati di maggiori capacità aggiungendo unità periferiche intelligenti aumenterà ulteriormente la diffusione dei controllori dedicati. La *Figura 11-5* riassume l'evoluzione nel campo del controllo industriale.

Analisi di andamento

L'analisi di andamento è l'analisi della storia di una variabile di un processo. Quando l'analisi di andamento è inclusa nella decisione dell'anello di controllo, possono essere prese decisioni molto migliori, poiché i dati includono anche la storia passata e non soltanto la situazione attuale. L'analisi di andamento è stata utilizzata in sistemi di controllo impieganti grandi calcolatori, ma sinora non ha trovato impiego nei sistemi incorporanti controllori a basso costo. Con l'aumento della capacità di calcolo dei controllori a microcalcolatore, questa importante analisi sarà disponibile in un numero sempre maggiore di sistemi.

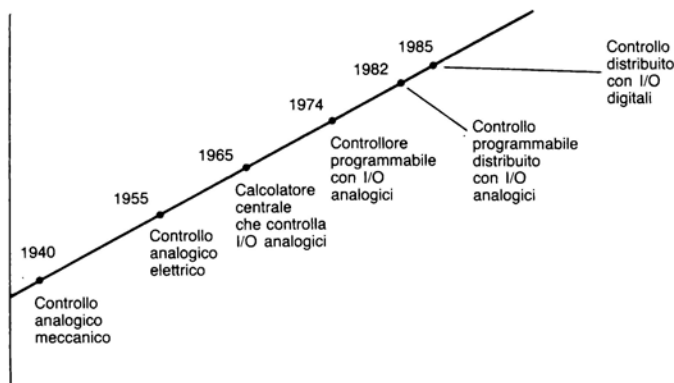



Figura 11-5. Evoluzione del controllo industriale

La previsione della manutenzione preventiva è un'applicazione che può usare i risultati dell'analisi di andamento. Osservando l'andamento di un parametro di un componente, è possibile prevedere quando il componente uscirà dalle specifiche. Il personale di manutenzione può usare questa informazione per prevedere il momento in cui fare le regolazioni o sostituire le parti per prevenire l'uscita dalle specifiche.

SISTEMI DI CONTROLLO A MICROCALCOLATORE

I microcalcolatori per controllo industriale includono un numero sempre maggiore di funzioni in un dato spazio, con più schede di input/output per unità periferiche e più configurazioni di sistema, e in futuro il loro uso sarà sempre più semplice. Attualmente la principale limitazione al loro impiego è lo sviluppo del software necessario per una particolare applicazione. Via via che aumenterà l'impiego dei sistemi, sarà sempre più sentita la necessità di un sistema operativo e di un linguaggio di programmazione standard per i controlli industriali che fornisca una comune interfaccia di software per far operare programmi scritti da vari utenti.
Quando il linguaggio comune sarà sviluppato, il successivo passo consisterà nell'usare un'apparecchiatura per l'identificazione della voce in modo che il programmatore e l'operatore possano letteralmente parlare al calcolatore. La combinazione di sistemi operativi facili da usare e di programmi di controllo facili da immettere espanderà moltissimo l'uso del microcalcolatore nell'ambiente di controllo industriale.

ROBOT

Attualmente la maggior parte dei robot è usata per applicazioni di presa e collocamento, e questa forma di automazione aumenterà enormemente nella prossima decade. Numerose applicazioni che attualmente usano attrezzature automatizzate di tipo standard saranno convertite per l'uso di robot. Come esposto nel Capitolo 9, i robot

più sofisticati hanno la capacità di imparare un'operazione mediante "spostamento manuale", e pertanto un abile tecnico è in grado di limitare in modo sostanziale le necessità di programmazione. Ciò rende l'uso dei robot più facile di quello di una macchina automatizzata di tipo standard.
Un notevole vantaggio di un sistema robotizzato è la capacità di svolgere compiti molto differenziati. Questo non avviene in una macchina automatica dedicata ad uno scopo particolare, ed è uno dei moti che rendono così interessante l'uso dei robot. Non è che il robot riesca a fare cose che nessun'altra macchina sa fare, ma ha il pregio di non essere limitato ad un unico compito per tutta la sua vita. Questo è l'elemento fondamentale della versatilità.
La versatilità consente di ripartire i costi di sviluppo e gli investimenti di un sistema a robot su un ampio numero di macchine, abbassando così il costo individuale del robot per unità di prodotto fabbricata. Questo abbassamento di costo rende possibile l'impiego dei robot in un maggior numero di applicazioni, e ciò aumenta il numero di robot richiesti. A sua volta il maggior numero di robot costruiti permette al fabbricante di robot di abbassare il costo di ogni singola unità, e questo porta ad un ancor maggiore numero di applicazioni, e così di seguito.

Occhi del robot

Una caratteristica dei robot, che aumenterà notevolmente le loro capacità, è l'impiego di sensori di immagine che forniscono la capacità di "vedere". Un robot privo di visione deve essere guidato da segnali di input dimensionali e angolari molto precisi per effettuare un compito di presa e collocamento, mentre a un robot con visione possono invece essere fornite indicazioni per porre il suo braccio nella posizione approssimata, e quindi il robot può usare i suoi sensori di immagine per guidare il braccio nel posto preciso.
Una telecamera o un formatore di immagini a stato solido possono essere usati come sensori di visione in alcune applicazioni in cui è richiesta una visione bidimensionale, ma per elaborare l'immagine sono necessari un notevole tempo di calcolatore e una grande memoria. Naturalmente, i sensori bilaterali necessari per la visione tridimensionale complicano il problema del calcolo e della memoria. Anche con i robot più sofisticati attualmente disponibili la visione non è in grado di avvicinarsi a quella dell'uomo, tuttavia si cercherà di sviluppare dei sensori di immagine che si avvicinino maggiormente alle capacità umane. Questo sviluppo della visione, unitamente a una maggiore capacità di calcolo e di memoria con minor ingombro dimensionale e con più basso costo consentirà ai robot di avere delle prestazioni eccezionali.

AFFIDABILITÀ DELLE APPARECCHIATURE PER AUTOMAZIONE

Per essere facilmente accettato, un prodotto dovrebbe avere una storia di funzionamento affidabile. Un prodotto sviluppato da poco tempo, anche se incorpora una migliore tecnologia e alla lunga può provare di essere più affidabile, inizialmente non ha storia. Pertanto, l'uso di un componente o di un prodotto che non sia stato impiegato in precedenza comporta un certo rischio, e in molti casi può essere conveniente continuare ad usare un componente o un prodotto che abbia caratteristiche controllabili, anziché assumere il rischio connesso a un prodotto nuovo. Anche i più recenti sviluppi in campo spaziale, come la "space shuttle", impiegano apparecchiature sviluppate da molti anni che sono state scelte proprio per la loro provata affidabilità.

La valutazione del rischio quando si sostituiscono parti elettromeccaniche o meccaniche con componenti a stato solido comporta le seguenti considerazioni:

1. L'usura delle parti meccaniche o elettromeccaniche solitamente provoca dei problemi di affidabilità. Per ogni macchina dovrebbero essere considerati sia il tempo di arresto per la manutenzione preventiva sia quello per le riparazioni.

2. Il controllo elettronico non elimina completamente le parti meccaniche o elettromeccaniche, ma ne riduce notevolmente il numero aumentando corrispondentemente l'affidabilità. Come risultato, i fermi per guasti diminuiscono e il tempo fra le operazioni di manutenzione preventiva aumenta notevolmente.

3. Quando in fase di progettazione vengono adottati gli opportuni margini di sicurezza, la maggior parte dei guasti elettronici o dei guasti di macchina sono inputabili a saldature o a connessioni di cavi. Usando circuiti integrati, dove tutti i componenti sono realizzati contemporaneamente sulla stessa lastrina di silicio con un trattamento uniforme e standard, le saldature e i collegamenti dei cavi sono notevolmente ridotti, e pertanto l'affidabilità aumenta di vari ordini di grandezza.

4. Anche se un nuovo controllo elettronico non è mai stato usato in precedenza, l'affidabilità dei singoli componenti (che hanno una storia eccellente poiché sono stati fabbricati per parecchio tempo) fornisce un'ottima base per una previsione dell'affidabilità del nuovo controllo.

5. L'affidibilità di una nuova famiglia di circuiti integrati può essere prevista sulla base dell'affidabilità dimostrata da tipi similari di circuiti integrati realizzati in base allo stesso processo. Pertanto, l'affidabilità di un nuovo prodotto che usa i nuovi circuiti integrati può essere prevista per fornire indicazioni sull'uso del nuovo prodotto in un sistema.

Quantità di guasti

La *Figura 11-6* mostra la curva tipica della quantità di guasti nel tempo per un componente (l'andamento della curva sovente è detto "a vasca da bagno", per un ovvio motivo). La curva mostra un periodo con quantità di guasti relativamente elevata all'inizio della vita dei componenti, poi un periodo con quantità di guasti più bassa e pressoché costante, e infine un graduale aumento dei guasti verso la fine della vita prevista per il componente. Il periodo iniziale con elevata quantità di guasti è indicato come periodo di "mortalità infantile". Il periodo con quantità di guasti costante è la parte più utile della vita del componente, e un piano di manutenzione preventiva dovrebbe prevedere una sostituzione del componente prima che aumenti la quantità di guasti, al fine di prevenire arresti di macchina.

I dispositivi a semiconduttore hanno un periodo di mortalità infantile molto breve, di sole 50-200 ore di funzionamento, e poi segue un periodo molto lungo con una quantità di guasti costantemente bassa. Pertanto, se un dispositivo a semiconduttore viene fatto funzionare in un circuito di prova per un tempo corrispondente al periodo della mortalità infantile senza che si verifichino guasti, lo si può installare in un prodotto fabbricato con la fiducia che non si guasterà fino al termine della sua vita utile. Questa procedura aumenta notevolmente l'affidabilità del prodotto fabbricato, e viene usata per numerosi prodotti a stato solido al fine di eliminare i guasti dovuti a mortalità infantile.

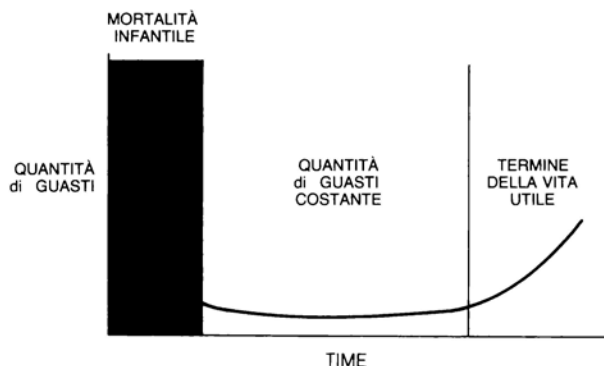



Figura 11-6. Quantità di guasti rispetto al tempo operativo di un componente

Malgrado ciò, l'uso di componenti a stato solido in sostituzione di quelli elettromeccanici nelle applicazioni di controllo industriale inizialmente ha incontrato resistenza da parte dei progettisti, poiché essi non vedevano alcun sostanziale beneficio nel cambiare i loro controllori. Tuttavia, il loro atteggiamento sta mutando via via che viene provata l'affidabilità enormemente superiore dei controllori a stato solido.

Tempo medio fra i guasti

Una misura di affidabilità è il "tempo medio fra i guasti" (TMFG), che è il tempo in ore mediamente intercorrente fra un guasto e il successivo guasto di un componente o di un sistema. Il tempo medio fra i guasti è una media statistica ottenuta sottoponendo a prove un campione significativo di parti. Se i guasti che si verificano sono di natura casuale, la curva che indica il numero di guasti rispetto al tempo è quella di una normale distribuzione (la ben nota curva a forma di campana); cioè, alcune parti si guastano presto e altre tardi, ma la maggioranza si guasta in un ristretto campo circa allo stesso tempo.
Le condizioni in cui è misurato il tempo medio fra i guasti dovrebbero essere le peggiori. Ciò significa che il componente in esame dovrebbe essere assoggettato a temperature molto alte e molto basse, ad elevata umidità relativa, a vibrazioni, a colpi e, possibilmente, a spruzzi di atmosfera salina. Queste condizioni, ovviamente, devono rientrare nei campi specificati dal fabbricante. Il tempo medio fra i guasti di un prodotto che non venga sollecitato ai limiti della sua capacità operativa solitamente aumenterà moltissimo. Così, se il prodotto in pratica opererà in un ambiente con aria condizionata dove l'umidità e la temperatura sono controllate, e se subirà pochi colpi e poche vibrazioni, il suo tempo medio fra i guasti sarà molto più elevato che non se fosse usato nelle peggiori condizioni. Naturalmente, il tempo medio fra i guasti può essere aumentato anche con un efficace piano di manutenzione preventiva.

Poiché un nuovo prodotto non ha storia operativa, le previsioni sulla sua affidabilità devono essere fatte con altri mezzi. A tal fine ci si può avvalere della tecnica dei modelli e si può far una proiezione sulla base dell'affidabilità di prodotti simili. Il MIL-STD Handbook 217 statunitense fornisce dei metodi per calcolare il grado di affidabilità dei componenti a semiconduttori nelle peggiori condizioni di sollecitazione. Solitamente questi metodi conducono a una ragionevole previsione del tempo medio fra i guasti, e possono essere utilizzati anche per confrontare statistiche di affidabilità quando, per esempio, il prodotto viene usato ad una temperatura diversa da quella specificata.

Tempo medio di riparazione

Il tempo medio di riparazione (TMDR) è il tempo medio per la diagnosi e la riparazione di un sistema guasto. Questo tempo dipende da un certo numero di fattori: la facilità di riparazione del sistema, la disponibilità di parti di ricambio, l'esperienza del personale di manutenzione sul prodotto in questione, e il metodo con il quale il componente viene riparato. Se un intero sistema può essere semplicemente disinserito da connettori e sostituito con un sistema di ricambio, il tempo di riparazione è molto ridotto; tuttavia, occorre avere un altro sistema di scorta. All'altro estremo, se la riparazione deve essere effettuata a livello della parte che si è effettivamente guastata, il tempo di riparazione sarà molto più lungo. Occorre bilanciare il costo delle parti di ricambio da mantenere di scorta con quello della perdita di produzione determinata dal fermo della macchina. Se viene scelto il corretto livello di riparazione, mediante calcolo o mediante un'analisi degli effettivi guasti, dovrebbe essere possibile raggiungere un compromesso in modo da tenere di scorta solamente la piccola quantità di parti che sono responsabili della maggior parte dei guasti.

Disponibilità di prodotto

La disponibilità di prodotto (DDP) è un dato statistico più significativo, particolarmente quando il sistema è costruito soprattutto con parti a semiconduttori. È il rapporto fra il tempo totale di vita di un prodotto e il tempo in cui esso è effettivamente disponibile per l'uso, e viene definito da:

$$DDP = TMGF/(TMFG + TMDR)$$

In passato quando le apparecchiature erano semplici, il tempo medio fra i guasti (TMFG) poteva essere sufficiente per valutare la disponibilità dell'apparecchiatura. I guasti erano abbastanza frequenti, ma il loro tempo di riparazione era breve, poiché il sistema di controllo era semplice e gli addetti alla manutenzione potevano rapidamente diagnosticare numerosi problemi dato che gli stessi problemi si verificavano più e più volte a brevi intervalli di tempo.

L'uso di componenti a semiconduttori ha cambiato questo stato di fatto, poiché il tempo medio fra i guasti è molto più grande. Pertanto, quando si verifica un guasto, il personale di manutenzione solitamente non ha abbastanza esperienza nella riparazione di quella particolare apparecchiatura e il tempo medio di riparazione (TMDR) può aumentare sensibilmente. Può essere significativo analizzare il seguente esempio.

Un sistema di controllo realizzato con 20 relè dello stesso tipo è in funzione per un turno di otto ore al giorno. Il tempo medio fra i guasti di un relè è di 1000 ore di

funzionamento, tuttavia il tempo medio fra i guasti del sistema è calcolato di circa 50 ore. Cioè, è previsto un guasto all'incirca ogni sei giorni di funzionamento. Il personale di manutenzione dopo un breve periodo di tempo diventerà molto efficiente nella riparazione dei guasti e nella sostituzione dei relè, e se il tempo medio di riparazione è di 2 ore, la disponibilità di prodotto è circa il 96% del tempo.
Se lo stesso sistema impiega componenti a stato solido, si supponga che il tempo medio fra i guasti del sistema sia aumentato di un fattore 10, e che quindi il tempo fra i guasti sia superiore a 60 giorni di funzionamento. La macchina è più affidabile di quanto ci si potesse aspettare, tuttavia la riparazione dei guasti richiede più tempo. Infatti, la riparazione a livello di componente ora richiede circa 20 ore, cioè 10 volte più di prima. La disponibilità di prodotto non è variata ed è ancora pari al 96% (480/480+20), tuttavia all'utente l'apparecchiatura può sembrare peggiore, poiché l'interruzione è di 20 ore per volta. In realtà questo potrebbe essere un aspetto negativo per l'organizzazione della produzione, poiché è più facile porre riparo a un fermo macchina ricorrente di 2 ore alla settimana che non a un fermo alquanto imprevedibile di 20 ore che può verificarsi proprio quando è necessaria la massima produzione.

Metodo di manutenzione per controllori a stato solido

L'aspetto fondamentale della precedente analisi è che per i controllori a stato solido è necessario un differente programma di manutenzione. Per ridurre i tempi di riparazione è opportuno avere presenti nel sistema degli indicatori di guasto e delle routine di autoverifica, e avere la possibilità di un funzionamento passo a passo. Le routine di manutenzione preventiva, che cercano di mettere in evidenza un parametro che si avvicina a un valore limite, sono anch'esse molto importanti.
Pure le tecniche di riparazione cambiano. Quando si verifica un guasto, invece di effettuare le riparazioni a livello di componente è più conveniente sostituire un intero sottoassieme con un altro di ricambio. Se l'apparecchiatura non è stata autofabbricata, un programma di scambio con il fabbricante o con il fornitore dell'attrezzatura consentirà di avere un sottoassieme nuovo o ricondizionato a un costo prestabilito. La riparazione del sottoassieme difettoso a livello del componente viene poi effettuata dal fabbricante stesso dell'apparecchiatura, che per questo scopo impiega apparecchiature di prova automatizzate e i tecnici esperti che hanno già effettuato le prove durante la fabbricazione del prodotto. Se viene usato questo metodo, è ancora più importante scegliere un fabbricante che dia affidamento e che resti in attività per tutta la durata prevista del prodotto.

SPECIFICHE DI AFFIDABILITÀ DEL CONTROLLORE

Ogni applicazione, naturalmente, deve essere valutata su una base individuale. L'ambiente particolare in cui viene utilizzato il prodotto può essere molto differente da quello specificato nei dati forniti dal fabbricante, tuttavia in molte applicazioni le condizioni di uso non sono più gravose delle peggiori condizioni in cui l'apparecchiatura è stata provata dal fabbricante. In queste applicazioni l'apparecchiatura solitamente avrà un'affidabilità maggiore.
Quando si sceglie un prodotto per impiegarlo in un sistema di controllo, occorre anzitutto determinare i fattori principali che influenzano l'affidabilità. In molti casi questi sono i

fattori ambientali, come il campo della temperatura operativa, l'umidità, i colpi e le vibrazioni. Se le condizioni operative o di ambiente sono estreme, si dovrebbe scegliere un prodotto particolarmente robusto che sia stato progettato e provato per funzionare entro limiti estesi o in un ambiente difficile. I guasti diminuiscono e la vita del sistema aumenta se il prodotto opera entro limiti meno gravosi di quelli usati per le prove di affidabilità. Se un prodotto deve funzionare in condizioni vicine a quelle dei suoi limiti di affidabilità, è opportuno scegliere un prodotto che consenta di effettuare facilmente procedure di manutenzione preventiva, onde ridurre i tempi di arresto del sistema.

Controllori a microcalcolatore

In molti casi i sistemi a microcalcolatore usati nei controllori industriali non sono stati specificamente progettati per operare in un ambiente difficile, ma hanno egualmente un'ottima affidabilità. I moduli TM990 usati nell'assieme a calcolatore analizzato nel Capitolo 10 hanno dimostrato un tempo medio fra i guasti superiore a quattro anni. Questi prodotti sono disponibili con uno strato di rivestimento superficiale che sigilla i componenti e il pannello a circuito stampato per proteggerli dalla rugiada e dall'umidità ambientale; tale rivestimento costituisce anche un supporto meccanico per i componenti che risulta utile quando l'apparecchiatura viene assoggettata a vibrazioni. Quando i prodotti TM990 saranno stati usati per più tempo e sarà stata raccolta una loro storia, sarà possibile apportare dei perfezionamenti di progettazione per aumentare ulteriormente il loro tempo medio fra i guasti.
La *Figura 11-7* contiene alcuni dati sui prodotti TM990 assoggettati a prove di affidabilità a 65°C. Su un totale di 376.000 ore di funzionamento si sono verificati soltanto nove guasti di componenti, e si è calcolato che il tempo medio fra i guasti è superiore a quattro anni. La *Figura 11-7* indica che una prova dinamica di funzionamento fatta su tutti i prodotti prima dell'inizio delle rilevazioni di affidabilità riduce significativamente la mortalità infantile.

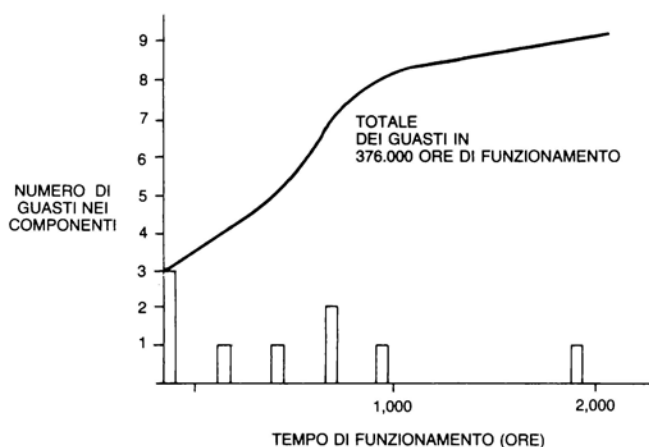



Figura 11-7. Dati delle prove di affidabilità del TM990

Controllori programmabili

I controllori programmabili sono previsti appositamente per funzionare in un ambiente industriale difficile, e solitamente viene effettuata una prova di funzionamento per ridurre i guasti sulla macchina. Il tempo medio di riparazione viene ridotto acquistando dei sottoassiemi di ricambio per riparare rapidamente il sistema, e una speciale analisi dei guasti identifica rapidamente il modulo difettoso o il sottoassieme sostituibile; il sottoassieme viene poi riparato separatamente o inviato al fabbricante per la riparazione. Con queste procedure il tempo medio di riparazione è breve e il tempo medio fra i guasti lungo, e pertanto la disponibilità di prodotto è molto elevata.

CHE COSA SI È APPRESO?

1. In futuro l'elaborazione distribuita verrà sempre più usata per l'automazione industriale.

2. Saranno usate più reti di comunicazione di dati con architettura di bus standard per migliorare il controllo e ottenere rapporti sulle operazioni di fabbricazione e di processo.

3. Con l'aumento dei controlli elettronici nei sistemi di automazione, il costo delle apparecchiature diminuirà e ciò le renderà più vantaggiose per l'automazione di un maggior numero di processi di fabbricazione.

4. Le prestazioni dei sensori aumenteranno impiegando componenti a stato solido per le operazioni di rilevamento. Molti sensori comprenderanno un microprocessore direttamente sullo stesso chip.

5. Gli attuatori avranno una maggiore intelligenza nel punto di controllo e richiederanno meno interfaccia e meno calcoli da parte del calcolatore di controllo.

6. Sebbene numerosi robot siano relativamente poco sofisticati, e altri siano troppo costosi per la maggior parte delle attuali applicazioni, i robot hanno un grande potenziale di impiego. In futuro la loro diffusione aumenterà ed essi saranno sempre più utili.

7. Lo sviluppo di sensori di visione e di processori di visione economicamente vantaggiosi sarà probabilmente il passo più significativo per l'espansione delle capacità dei robot.

8. Ai controllori programmabili verrà aggiunta una maggiore capacità funzionale, mentre verrà mantenuta la facilità di programmazione legata al diagramma a scala. Queste unità continueranno a fornire una soluzione affidabile, a basso costo e di facile uso per numerose applicazioni di automazione.

9. L'impiego di microprocessori e microcalcolatori per il controllo industriale si diffonderà maggiormente quando verranno sviluppati linguaggi più facili da usare e sistemi operativi standard appositamente previsti per applicazioni di automazione.

10. L'uso di apparecchiature a semiconduttori aumenterà quando un maggior numero di persone riconoscerà i loro vantaggi e la loro migliore affidabilità.

11. Dovranno essere usate nuove tecniche per ridurre il tempo medio di riparazione, poiché le apparecchiature di controllo a stato solido, che hanno un tempo medio fra i guasti molto elevato, tendono ad avere un tempo medio di riparazione più lungo delle apparecchiature elettromeccaniche.

Quiz per il Capitolo 11

1. Storicamente i sistemi centrali sono stati usati poiché:
   a. la memoria era molto costosa.
   b. non era disponibile la memoria a semiconduttore.
   c. la memoria consumava una notevole quantità di potenza.
   d. tutto quanto sopra.
   e. nulla di quanto sopra.

2. I sensori:
   a. probabilmente non miglioreranno nella prossima decade.
   b. sono sviluppati in modo facile.
   c. sono poco importanti nell'automazione.
   d. in futuro saranno molto più intelligenti e sofisticati.
   e. tutto quanto sopra.

3. Un sensore intelligente a stato solido:
   a. integra una logica e un sensore a stato solido in un'unica unità.
   b. ha due o tre substrati.
   c. attualmente non è disponibile.
   d. tutto quanto sopra.
   e. nulla di quanto sopra.

4. La maggior parte della trasmissione di dati in futuro sarà:
   a. un flusso di dati codificati sotto forma di bit digitali.
   b. di natura analogica.
   c. effettuata su linee telefoniche metalliche.
   d. nulla di quanto sopra.

5. La logica VSI;
   a. comporta prodotti elettronici più costosi.
   b. non sarà disponibile in questa decade.
   c. darà origine ad apparecchiature elettroniche di minor costo e più elevate capacità.
   d. tutto quanto sopra.

6. L'analisi di andamento:
   a. è usata soltanto nella pianificazione finanziaria.
   b. può migliorare la risposta di un sistema di controllo.
   c. è un nuovo concetto.
   d. richiede un sistema molto costoso per essere realizzata.
   e. nulla di quanto sopra.

7. In futuro i sistemi di controllo a microcalcolatore:
   a. manterranno la loro presente capacità.
   b. avranno più software standard disponibili per applicazioni industriali.
   c. tenderanno ad aumentare di costo
   d. tutto quanto sopra.
   e. nulla di quanto sopra.

8. Il riconoscimento della voce:
  a. non sarà mai usato nei controlli industriali.
  b. è già ampiamente usato nei controlli industriali.
  c. con il progredire della tecnologia verrà usato in un maggior numero di applicazioni.
  d. nulla di quanto sopra.

9. I robot:
  a. rappresentano il più potente strumento di automazione industriale attualmente disponibile.
  b. attualmente sono molto primitivi.
  c. saranno più utili quando la loro visione verrà significativamente migliorata.
  d. tutto quanto sopra.

10. I sensori di visione:
  a. non potranno migliorare molto nella prossima decade.
  b. rimarranno molto costosi.
  c. si avvicineranno maggiormente alle capacità dell'occhio umano.
  d. tutto quanto sopra.

11. la curva di affidabilità lungo la vita di un prodotto:
  a. ha tre distinte entità di guasti.
  b. non è prevedibile.
  c. rimane costante al variare delle condizioni ambientali.
  d. tutto quanto sopra.
  e. nulla di quanto sopra.

12. I dispositivi a semiconduttore:
  a. sono meno affidabili dei componenti elettromeccanici.
  b. usualmente hanno un tempo medio fra i guasti molto breve.
  c. hanno un periodo di mortalità infantile molto breve.
  d. tutto quanto sopra.
  e. nulla di quanto sopra.

Glossario

Amplificatore: dispositivo impiegato per aumentare la potenza o l'ampiezza di un segnale.

Amplificatore operazionale: blocco analogico standard con due input e un output avente un guadagno di tensione molto elevato.

Amplificatore proporzionale: componente di un sistema di controllo che produce un output di controllo proporzionale al suo input.

Anello aperto: sistema di controllo nel quale l'output è funzione soltanto degli input del sistema.

Anello chiuso: sistema di controllo nel quale l'output è retroazionato e confrontato con l'input per generare un segnale di errore. Questo segnale di errore è usato per produrre il nuovo segnale di output.

APT (Automatically Programmed Tools): linguaggio di programmazione usato per controllare il posizionamento, il movimento e la contornatura effettuata da una macchina utensile.

Assembly: linguaggio abbreviato con elementi mnemonici in lingua inglese che può essere impiegato per programmare dei calcolatori.

Attuatore: dispositivo che effettua un'azione in risposta a un segnale elettrico.

Automazione: uso di sistemi elettrici, elettronici e/o meccanici per controllare processi in modo automatico.

Binario, sistema o codice: metodo di rappresentazione di numeri facente uso di due sole cifre: 0 e 1. In un numero binario ciascuna successiva posizione di bit rappresenta 1, 2, 4, 8, e così di seguito.

Bit: la più piccola parte di dato binario che un calcolatore può manipolare.

Byte: gruppo di bit, generalmente 8, che sono manipolati come una singola unità.

Campionatura: raccolta periodica di informazioni.

Ciclo limite: modo di controllare il funzionamento di un sistema in cui la variabile controllata compie spostamenti ciclici fra i limiti estremi, con una media vicina al valore desiderato.

Circuiti digitali: circuiti elettronici il cui output può variare soltanto in momenti specificati e fra un limitato numero di tensioni differenti.

Circuiti logici: circuiti elettronici digitali, comunemente chiamati porte, che effettuano operazioni logiche come NOT, AND, OR e loro combinazioni.

Condizionamento di segnale: cambiamento o alterazione di un segnale in modo che assuma una forma adatta per l'impiego da parte di un dispositivo elettrico o elettronico.

Controllo analogico: tipo di controllo in cui la variabile controllata varia gradualmente e continuamente in ampiezza.

Controllo continuo: controllo avente la capacità di cambiare continuamente un parametro di input nel suo intero campo di variazione.

Controllo digitale: uso di circuiti digitali e tecniche digitali per controllare un'applicazione.

Controllo numerico: sistema nel quale le azioni di una macchina utensile o di un gruppo di macchine utensili sono controllate da un programma di calcolatore registrato su un nastro di carta o su un nastro magnetico.

Controllo numerico a calcolatore: sistema nel quale una macchina utensile è controllata da un calcolatore dedicato alla macchina stessa.

Controllo numerico diretto: sistema nel quale un calcolatore controlla una o più macchine utensili.

Controllo proporzionale: modo di controllo nel quale l'output di un controllore è direttamente proporzionale all'errore della variabile controllata.

Controllore: elemento di un anello di controllo di processo che valuta l'errore della variabile controllata e inizia l'azione correttiva mediante un segnale alla variabile di controllo (manipolata).

Controllore programmabile: dispositivo programmabile a stato solido in grado di controllare un processo o una macchina.

Convertitore analogico/digitale (A/D): dispositivo che converte un segnale analogico campionato in un corrispondente codice digitale.

Convertitore digitale/analogico (D/A): dispositivo che converte un codice digitale in un equivalente livello di segnale analogico.

Costante di tempo: numero che caratterizza il tempo necessario affinché l'output di un componente, sottosistema o circuito raggiunga approssimativamente il 63% del valore finale dopo un cambiamento a gradino del suo input.

CPU (Central Processor Unit): parte di un sistema calcolatore che contiene la memoria principale, l'unità aritmetica e speciali gruppi di registri. Effettua operazioni aritmetiche, elabora istruzioni di controllo e fornisce segnali di temporizzazione.

Dati paralleli: codice binario a n bit la cui trasmissione o elaborazione è simultanea.

Dati seriali: codice binario a n bit la cui trasmissione o elaborazione viene fatta un bit alla volta.

Diagramma logico a scala: diagramma usato per descrivere le interconnessioni logiche e il collegamento elettrico di taluni sistemi di controllo.

Disturbo: parametro che influenza la variabile controllata, ma che non può essere controllato dal processore di controllo.

EAROM (Electrically Alterable Read-Only Memory): dispositivo di memoria di sola lettura il cui contenuto può essere cambiato elettronicamente.

EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory): dispositivo di memoria di sola lettura che può essere cancellato e riprogrammato.

Errore a regime: differenza fra l'input e l'output di un sistema dopo che l'input è stato applicato per un periodo di tempo relativamente lungo.

Esadecimale: sistema di numerazione in base 16. Le lettere A-F rappresentano i numeri decimali 10-15. Il numero binario 1001 1101 1111 0111 in esadecimale è 9DF7.

Esecuzione: fase di un ciclo di istruzione di un calcolatore durante la quale viene realmente effettuata l'operazione indicata dall'istruzione.

Flip-Flop: dispositivo elettronico digitale che memorizza un numero binario (bit) di informazione come 0 o 1.

FORTRAN: complesso linguaggio di programmazione di alto livello per calcolatore, che è a base matematica ed è orientato per la soluzione di problemi scientifici.

Funzione di trasferimento: risposta di un elemento di un anello di controllo di processo che specifica come l'output del dispositivo viene influenzato dall'input.

Guadagno: rapporto fra l'ampiezza di output e l'ampiezza di input di un sistema.

Integratore: circuito elettronico che effettua l'operazione matematica di integrazione. Quando il segnale di input è tracciato rispetto al tempo, il segnale di output è proporzionale all'area al di sotto della forma d'onda del segnale di input.

Interruzione: metodo per richiamare rapidamente l'attenzione di un calcolatore su un particolare evento esterno.

Linguaggio di macchina: il più basso livello di linguaggio di programmazione. Le istruzioni codificate consistono in una stringa di numeri binari.

Linguaggio di programmazione: serie di regole che governano la forma usata per scrivere le istruzioni di un programma.

Memoria: sottosistema di calcolatore usato per immagazzinare istruzioni e dati sotto forma di codici binari.

Microcalcolatore: calcolatore di piccole dimensioni che usa un microprocessore come CPU e che contiene tutte le funzioni di un calcolatore.

Microprocessore: circuito integrato che contiene tutte le funzioni di una CPU.

PI: designazione di un controllore che opera in modo combinato proporzionale-integrato.

PID: designazione di un controllore che opera in modo combinato proporzionale-integrato-derivato. È anche chiamato «a tre modi».

Prelevamento: fase di un ciclo di istruzione di un calcolatore durante la quale viene estratta dalla memoria del sistema la successiva istruzione da eseguire.

Processo: qualsiasi sistema composto di variabili dinamiche, solitamente impiegato in operazioni di fabbricazione e produzione.

Processo a lotti: processo in cui vengono effettuate alcune operazioni su uno o più prodotti in entrata allo scopo di ottenere un prodotto finito.

Processo continuo: processo nel quale ad una estremità del sistema entrano materiali grezzi e all'altra estremità esce un prodotto finito.

Processore: vedere CPU.

Programma: serie di istruzioni usate da un calcolatore per svolgere un compito.

PROM (Programmable Read-Only Memory): dispositivo di memoria programmabile di sola lettura.

Risposta ai transitori: la risposta di un sistema a un cambiamento improvviso di input.

Risposta di frequenza: grafico della risposta di un sistema a segnali di input aventi differenti frequenze (vedere: Funzione di trasferimento).

Ritardo di sistema: ritardo totale di tempo fra il momento in cui viene cambiata una variabile manipolata di un sistema e il momento in cui la variabile controllata risponde.

Ritardo di trasferimento: tempo che la variabile manipolata richiede per avere effetto sul processo.

Robot: manipolatore programmabile progettato per spostare materiali, parti o utensili con movimenti variabili.

ROM (Read-Only Memory): tipo di memoria le cui posizioni possono essere direttamente lette, ma non scritte.

RTD (Resistance Temperature Detector): rivelatore di temperatura a resistenza. Elemento di rame, platino o argento la cui resistenza varia linearmente con la temperatura.

Segnale digitale: informazione in forma discreta o quantizzata, non continua. I segnali digitali binari hanno due possibili stati (0 o 1) definiti da livelli di tensione o di corrente.

Semiconduttore: materiale con caratteristiche elettriche intermedie fra quelle dei conduttori e quelle degli isolanti. Viene usato per i transistori, i diodi e i circuiti integrati.

Sensore: dispositivo di conversione di energia che misura alcune quantità fisiche e le converte in una quantità elettrica.

Sensore piezoresistivo: traduttore che converte informazioni relative alla deformazione di oggetti solidi in un cambiamento di resistenza.

Sistema semicontinuo: sistema nel quale viene effettuata una sequenza di operazioni ognuna delle quali è continua.

Smorzamento ottimale: smorzamento che determina la miglior risposta nel tempo di un sistema di controllo.

Software: istruzioni di programma per comunicare ad un calcolatore che cosa deve fare.

Tempo medio di riparazione: tempo medio per la diagnosi e la riparazione di un sistema guasto.

Tempo medio fra i guasti: tempo medio, solitamente espresso in ore, durante il quale un componente o un sistema funzionerà fra un guasto e il successivo.

Tempo morto: ritardo di tempo, causato dalla distanza fisica, che si verifica prima che qualsiasi cambiamento nella variabile manipolata venga rilevato da un sensore.

Termistore: trasduttore di temperatura costruito con materiali semiconduttori che converte un cambiamento di temperatura in un cambiamento di resistenza.

Termocoppia: giunzione fra due materiali diversi che produce una tensione che varia in modo pressoché lineare in funzione della temperatura alla giunzione.

Tubo di Venturi: tubo che viene usato per effettuare misurazioni di flusso in base alla variazione di pressione in corrispondenza ad un restringimento.

Unità periferica: dispositivo esterno di input/output collegato ad un calcolatore.

Valore prefissato: valore desiderato di una variabile controllata in un anello di controllo di processo.

Variabile controllata: variabile di processo regolata dall'anello di controllo del processo.

Variabile di carico: cambiamento simile ad un disturbo, ma che è previsto dalla natura del processo controllato.

Variabile di processo: qualsiasi parametro di processo che può cambiare valore.

Variabile manipolata: parametro cambiato dal controllore per mantenere la variabile controllata al valore desiderato.

Risposte ai quiz

Capitolo 1
1. **b**
2. **d**
3. **b**
4. **d**
5. **d**
6. **b**
7. **d**
8. **b**
9. **c**
10. **c**
11. **b**
12. **a**
13. **d**
14. **b**
15. **b**
16. **d**
17. **a**
18. **d**
19. **d**
20. **a**

Capitolo 2
1. **c**
2. **d**
3. **d**
4. **d**
5. **b**
6. **d**
7. **d**
8. **d**
9. **b**
10. **d**
11. **c**
12. **d**
13. **e**
14. **a**
15. **d**
16. **b**
17. **d**
18. **d**
19. **d**
20. **b**

Capitolo 3
1. **e**
2. **d**
3. **c**
4. **d**
5. **d**
6. **c**
7. **e**
8. **d**
9. **d**
10. **d**
11. **e**
12. **b**
13. **d**
14. **d**
15. **d**
16. **d**
17. **e**
18. **d**
19. **c**
20. **d**

Capitolo 4
1. **d**
2. **b**
3. **d**
4. **a**
5. **d**
6. **a**
7. **c**
8. **d**
9. **c**
10. **b**

Capitolo 5
1. **b**
2. **d**
3. **a**
4. **b**
5. **b**
6. **a**
7. **a. 1**
   b. 3
   c. 4
   d. 2
8. **a**
9. **d**
10. **c**
11. **b**
12. **c**
13. **a**
14. **b**
15. **b**
16. **a**
17. **c**
18. **Falso**
19. **c**
20. **a**

Capitolo 6
1. **d**
2. **c**
3. **d**
4. **a**
5. **b**
6. **c**
7. **d**
8. **d**
9. **d**
10. **c**
11. **b**
12. **c**

Capitolo 7
1. **d**
2. **a**
3. **d**
4. **c**
5. **b**
6. **c**
7. **b**
8. **b**
9. **b**
10. **a**

Capitolo 8
1. **e**
2. **e**
3. **c**
4. **e**
5. **a**
6. **d**
7. **a**
8. **c**
9. **d**
10. **a**

Capitolo 9
1. **b**
2. **a**
3. **c**
4. **d**
5. **b**
6. **e**
7. **e**
8. **e**
9. **d**
10. **d**
11. **c**
12. **a**
13. **b**
14. **d**
15. **d**
16. **b**
17. **d**
18. **d**
19. **d**
20. **b**

Capitolo 10
1. **e**
2. **b**
3. **d**
4. **a**
5. **c**
6. **b**
7. **d**
8. **a**
9. **d**
10. **d**

Capitolo 11
1. **d**
2. **d**
3. **a**
4. a
5. **c**
6. **b**
7. **b**
8. **c**
9. **d**
10. **c**
11. **a**
12. **c**

Indice Analitico

L'elettronica nell'automazione – dai sistemi ad anello aperto ai robot – è la chiave della produttività.
Questo volume contiene un'analisi dei concetti fondamentali e insegna come l'elettronica e i sistemi digitali possano controllare il funzionamento delle macchine ed estenderne le possibilità applicative. Ampiamente illustrato e scritto in linguaggio semplice ed accettabile al neofita, è l'ideale per l'apprendimento su base individuale.

L. 29.500

COD 616 P ISBN 88-7056-227-1

GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON
Neil M. Schmitt
Robert F. Farwell
IL CONTROLLO AUTOMATICO
DEI SISTEMI
192